

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Antonio Božić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Krešimir Grilec

Student:

Antonio Božić

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svom mentoru prof. dr. Krešimiru Grilecu na ukazanom povjerenju da ću ovaj zadatak izvršiti na zadovoljavajući način i u roku. Također dugujem zahvalnost za upućivanje na odabranu temu, kao i za korisne savjete prilikom izrade ovog rada.

Posebnu zahvalu dugujem svojoj obitelji i prijateljima na potpori koju su mi pružili tokom svih ovih godina mog studiranja.

Zagreb, srpanj 2013.

Antonio Božić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antonio Božić**

Mat. br.: 0069029431

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **USPOREDBA OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE RAZLIČITIH MATERIJALA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **COMPARISON OF ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF DIFFERENT MATERIALS**

Opis zadatka:

Abrazijsko trošenje je istiskivanje materijala izazvano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Oko 50% svih slučajeva trošenja otpada na abraziju. Jedna od metoda ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje je metoda "suhi pijesak/gumeni kotač".

U ovom radu je potrebno:

- 1) Opisati mehanizam abrazijskog trošenja te navesti metode ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje
- 2) Detaljno opisati metodu "suhi pijesak/gumeni kotač"
- 3) Usporediti dostupne rezultate ispitivanja ovom metodom za različite vrste materijala
- 4) Analizirati rezultate i dati zaključak

Zadatak zadan:
16. studenog 2012.

Rok predaje rada:
1. rok: 15. veljače 2013.
2. rok: 11. srpnja 2013.
3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.
2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.
3. rok: 18., 19. i 20. rujna 2013.

Zadatak zadao:

K. Grilec

Prof.dr.sc. Krešimir Grilec

Predsjednik Povjerenstva:

Z. Kunica

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	1
POPIS TABLICA	2
POPIS OZNAKA.....	6
SAŽETAK.....	7
SUMMARY	8
1. UVOD.....	9
2. ABRAZIJSKO TROŠENJE I METODE ISPITIVANJA OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE.....	10
2.1. Abrazijsko trošenje	10
2.2. Metode ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje	11
2.2.1. Otpornost na abraziju.....	12
2.2.2. Popis osnovnih metoda	13
3. METODA “SUHI PIJESAK/ GUMENI KOTAČ“.....	14
3.1. Opis metode “suhi pijesak/ gumeni kotač“	14
3.2. Varijante metode “suhi pijesak/ gumeni kotač“	15
3.3. Uređaj za provedbu metode “suhi pijesak/ gumeni kotač“	16
3.3.1. Gumeni kotač	16
3.3.2. Abraziv.....	16
3.3.3. Mlaznica za pijesak	17
3.3.4. Pogonski motor.....	17
3.3.5. Držač ispitnog uzorka i momentna poluga	18
3.3.6. Analitička vaga.....	18
3.4. Priprema uzoraka i uzrokovanje.....	19
3.5. Postupak provođenja ispitivanja.....	20
3.6. Računanje i obrada rezultata ispitivanja	20

4.	USPOREDBA REZULTATA ISPITIVANJA	22
4.1.	Rezultati ispitivanja etilen metakril kopolimera	22
4.2.	Rezultati ispitivanja željeznih lijevova, tvrdog metala i bazalta	22
4.3.	Rezultati ispitivanja cementiranog i boriranog sloja	24
4.4.	Rezultati ispitivanja aluminijskog oksida, polimerne prevlake i mjedi.....	25
4.5.	Rezultati ispitivanja kaljenog čelika i bijelog lijeva.....	27
4.6.	Rezultati ispitivanja kaljenog čelika, bijelog lijeva i nehrđajućeg austenitnog čelika	31
4.7.	Rezultati ispitivanja sinteriranog tvrdog metala i alatnog čelika	36
4.8.	Rezultati ispitivanja općeg konstrukcijskog čelika, čelika za poboljšavanje i HARDOX-a.....	37
4.9.	Rezultati ispitivanja nodularnog lijeva	38
4.10.	Rezultati ispitivanja čelika za poboljšavanje i nitridnog sloja	40
4.11.	Rezultati ispitivanja austenitnih čelika	42
4.12.	Rezultati ispitivanja poboljšanih, nitriranih i tvrdo kromiranih čelika.....	44
4.13.	Rezultati ispitivanja poboljšanog, nitrokarburiranog, boriranog i vanadiranog čelika.....	47
4.14.	Rezultati ispitivanja izotermički poboljšanog i kugličarenog nodularnog lijeva...	48
4.15.	Rezultati ispitivanja polimernih kompozitnih smola.....	49
4.16.	Rezultati ispitivanja toplinski obrađenog dupleks čelika	51
4.17.	Rezultati ispitivanja aluminij oksidne prevlake	52
5.	ANALIZA REZULTATA	55
6.	ZAKLJUČAK	63
7.	LITERATURA.....	64

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Abrazijsko trošenje triju tijela [2]	9
Slika 2.1. Abrazijsko trošenje [2]	10
Slika 2.2. Abrazija između dva tijela [2].....	10
Slika 2.3. Abrazija između tri tijela [2].....	10
Slika 2.4. Jedinični događaj abrazije [1]	11
Slika 3.1. Uređaj za mjerenje otpornosti na abrazijsko trošenje metodom "suhi pijesak/gumeni kotač" (Laboratorij za tribologiju FSB-a) [4].....	14
Slika 3.2. Shematski prikaz uređaja za test "suhi pijesak/ gumeni kotač" [5]	16
Slika 3.3. Držać uzorka na momentnoj poluzi [6]	18
Slika 3.4. Vaga Metler B5C 1000 [4]	18
Slika 3.5. Primjeri testnog uzorka nakon ispitivanja [2]	19
Slika 5.1. Usporedba rezultata prema mod. varijanti A, 130 N, 1000 okr.	55
Slika 5.2. Usporedba rezultata prema mod. varijanti A, 130 N, 500 okr.	56
Slika 5.3. Usporedba rezultata prema mod. varijanti A, 130 N, 200 okr.	57
Slika 5.4. Usporedba rezultata prema varijanti B	58
Slika 5.5. Usporedba rezultata prema varijanti C	59
Slika 5.6. Usporedba rezultata prema varijanti D	60
Slika 5.7. Usporedba rezultata prema mod. varijanti D, 45 N, 1000 okr.	60
Slika 5.8. Usporedba rezultata prema mod. varijanti D, 45 N, 500 okr.	61
Slika 5.8. Usporedba rezultata prema mod. varijanti D, 45 N, 100 okr.	61
Slika 5.9. Usporedba rezultata prema mod. varijanti D, 45 N, 100 okr.	62

POPIS TABLICA

Tablica 1. Značajke varijanti postupka	15
Tablica 2. Rezultati ispitivanja 01-1	22
Tablica 3. Rezultati ispitivanja 02- 01 Sivi lijev	23
Tablica 4. Rezultati ispitivanja 02- 02 Nodularni lijev	23
Tablica 5. Rezultati ispitivanja 02- 03 Tvrdi metal	24
Tablica 6. Rezultati ispitivanja 02- 04 Bazalt.....	24
Tablica 7. Rezultati ispitivanja 03- 01 Cementirana površina.....	25
Tablica 8. Rezultati ispitivanja 03- 02 Borirana površina.....	25
Tablica 9. Rezultati ispitivanja 04- 01 Al_2O_3	26
Tablica 10. Rezultati ispitivanja 04- 02 Al_2O_3 sa fosfatima.....	26
Tablica 11. Rezultati ispitivanja 04- 03 TPC	27
Tablica 12. Rezultati ispitivanja 04- 04Mjed	27
Tablica 13. Rezultati ispitivanja 05- 01 čelika EN C60 - pijesak.....	28
Tablica 14. Rezultati ispitivanja 05- 02 čelika EN C60 - staklo	28
Tablica 15. Rezultati ispitivanja 05- 03 Bijeli lijev, lijevan - pijesak.....	28
Tablica 16. Rezultati ispitivanja 05- 04 Bijeli lijev, lijevan - staklo	29
Tablica 17. Rezultati ispitivanja 05- 05 Bijeli lijev, kaljen - pijesak.....	29
Tablica 18. Rezultati ispitivanja 05- 06 Bijeli lijev, kaljen - staklo	29
Tablica 19. Rezultati ispitivanja 05- 07 Bijeli lijev, boriran - pijesak	30
Tablica 20. Rezultati ispitivanja 05- 08 Bijeli lijev, boriran - staklo.....	30
Tablica 21. Rezultati ispitivanja 05- 09 Bijeli lijev, vanadiran - pijesak	30
Tablica 22. Rezultati ispitivanja 05- 10 Bijeli lijev, vanadiran - staklo.....	31
Tablica 23. Rezultati ispitivanja 06- 01 Nehrđajući austenitni čelik, pijesak	32
Tablica 24. Rezultati ispitivanja 06- 02 Nehrđajući austenitni čelik, staklo.....	32
Tablica 25. Rezultati ispitivanja 06- 03 Nehrđajući austenitni čelik, kalcit.....	32
Tablica 26. Rezultati ispitivanja 06- 04 čelika EN C60 - pijesak.....	33

Tablica 27. Rezultati ispitivanja 06- 05 čelika EN C60 - staklo	33
Tablica 28. Rezultati ispitivanja 06- 06 čelika EN C60 - kalcit	33
Tablica 29. Rezultati ispitivanja 06- 07 Bijeli lijev, lijevan - pijesak.....	34
Tablica 30. Rezultati ispitivanja 06- 08 Bijeli lijev, kaljen - pijesak.....	34
Tablica 31. Rezultati ispitivanja 06- 09 Bijeli lijev, vanadiran - pijesak	34
Tablica 32. Rezultati ispitivanja 06- 10 Bijeli lijev, boriran - pijesak	35
Tablica 33. Rezultati ispitivanja 06- 11 Bijeli lijev, lijevan- staklo	35
Tablica 34. Rezultati ispitivanja 06- 12 Bijeli lijev, kaljen - staklo	35
Tablica 35. Rezultati ispitivanja 06- 13 Bijeli lijev, vanadiran - staklo.....	36
Tablica 36. Rezultati ispitivanja 06- 14 Bijeli lijev, boriran - staklo.....	36
Tablica 37. Rezultati ispitivanja 07- 01 Tvrdi metal na bazi TiC.....	37
Tablica 38. Rezultati ispitivanja 07- 02 Tvrdi metal na bazi WC	37
Tablica 39. Rezultati ispitivanja 07- 03 Sinterirani alatni čelik	37
Tablica 40. Rezultati ispitivanja 07- 01 HARDOX 450	38
Tablica 41. Rezultati ispitivanja 07- 02 Čelik EN C45.....	38
Tablica 42. Rezultati ispitivanja 07- 03 Čelik EN S355	38
Tablica 43. Rezultati ispitivanja 09-01 Nodularni lijev, postupak A	39
Tablica 44. Rezultati ispitivanja 09-02 Nodularni lijev, postupak B.....	39
Tablica 45. Rezultati ispitivanja 09-03 Nodularni lijev, postupak C.....	39
Tablica 46. Rezultati ispitivanja 09-04 Nodularni lijev, postupak D	40
Tablica 47. Rezultati ispitivanja 10- 01 Čelik EN CrMo4 Varijanta B	40
Tablica 48. Rezultati ispitivanja 10- 02 Čelik EN CrMo4 nitriran Varijanta B	40
Tablica 49. Rezultati ispitivanja 10- 03 Čelik EN CrMo4 Varijanta C	41
Tablica 50. Rezultati ispitivanja 10- 04 Čelik EN CrMo4 nitriran Varijanta C.....	41
Tablica 51. Rezultati ispitivanja 10- 05 Čelik EN 30CrNiMo8 Varijanta B	41
Tablica 52. Rezultati ispitivanja 10- 06 Čelik EN 30CrNiMo8 nitriran Varijanta B	41
Tablica 53. Rezultati ispitivanja 10- 07 Čelik EN 30CrNiMo8 Varijanta C	41

Tablica 54. Rezultati ispitivanja 10- 08 Čelik EN 30CrNiMo8 nitriran Varijanta C	41
Tablica 55. Rezultati ispitivanja 10- 09 Čelik EN CrMo4 Varijanta D, mod	42
Tablica 56. Rezultati ispitivanja 10- 11 Čelik EN CrMo4 nitriran Varijanta D, mod,	42
Tablica 57. Rezultati ispitivanja 10- 11 Čelik EN 30CrNiMo8 Varijanta D, mod.....	42
Tablica 58. Rezultati ispitivanja 10- 12 Čelik EN 30CrNiMo8 Varijanta D, mod, nitriran .	42
Tablica 59. Rezultati ispitivanja 11 [13]	43
Tablica 60. Rezultati ispitivanja 12- 01 Čelik EN C45 poboljššan.....	44
Tablica 61. Rezultati ispitivanja 12- 02 Čelik EN C45 nitriran	44
Tablica 62. Rezultati ispitivanja 12- 03 Čelik EN C45 tvrdo kromiran.....	45
Tablica 63. Rezultati ispitivanja 12- 04 Čelik EN 25CrMo4 poboljššan	45
Tablica 64. Rezultati ispitivanja 12- 05 Čelik EN 25CrMo4 nitriran.....	45
Tablica 65. Rezultati ispitivanja 12- 06 Čelik EN 25CrMo4 tvrdo kromiran.....	46
Tablica 66. Rezultati ispitivanja 12- 07 Čelik EN 36CrNiMo4 poboljššan	46
Tablica 67. Rezultati ispitivanja 12- 08 Čelik EN 36CrNiMo4 nitriran.....	46
Tablica 68. Rezultati ispitivanja 12- 09 Čelik EN 36CrNiMo4 tvrdo kromiran	47
Tablica 69. Rezultati ispitivanja 13 Čelik EN C45 topl. obrađen [15]	48
Tablica 70. Rezultati ispitivanja 14- 01 NL 60, kugl. 8 bar	48
Tablica 71. Rezultati ispitivanja 14- 02 NL 60, kugl. 6,5 bar	49
Tablica 72. Rezultati ispitivanja 14- 03 NL 60, kugl. 5 bar	49
Tablica 73. Rezultati ispitivanja 14- 04 NL 60, nekugličareno.....	49
Tablica 74. Rezultati ispitivanja 15- 01 Super Metal.....	50
Tablica 75. Rezultati ispitivanja 15- 02 Super Metal 10% HCl.....	50
Tablica 76. Rezultati ispitivanja 15- 03 Super E-Metal.....	50
Tablica 77. Rezultati ispitivanja 15- 04 Super E-Metal 10% HCl	50
Tablica 78. Rezultati ispitivanja 16- 01 Dupleks čelik X2 CrNiMoN 22 5 3	52
Tablica 79. Rezultati ispitivanja 19- 01 Varijanta D, mod.....	53
Tablica 80. Rezultati ispitivanja 19- 02 Varijanta C, mod., tip 1	53

Tablica 81. Rezultati ispitivanja 19- 03 Varijanta C, mod., tip 2	53
Tablica 82. Rezultati ispitivanja 19- 04 Varijanta C, mod., tip 3	53
Tablica 83. Rezultati ispitivanja 19- 05 Varijanta C, mod., tip 4	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
D	mm	promjer
F	N	sila
F_N	N	normalna komponenta sile opterećenja
F_T	N	tangencijalna komponenta sile opterećenja
GV	mm ³	gubitak volumena
KGV	mm ³	korigirani gubitak volumena
m	g	masa
n_{okr}	okr/min	broj okretaja kotača
R_{ab}		indeks otpornosti na abraziju
V	mm ³	volumen

SAŽETAK

Tema rada je usporedba rezultata dobivenih ispitivanjem prema metodi ASTM G65-85, koja određuje otpornost pojedinih materijala prema abraziji u ovisnosti o vrsti materijala, vrsti abraziva i parametrima provođenja ispitivanja. U radu su obrađena sva ispitivanja prema metodi ASTM G65-85 i svi podaci su prikazani tablično i dijagramski radi lakšeg uspoređivanja dobivenih podataka.

Ključne riječi: tribologija, abrazija, suhi pijesak/gumeni kotač.

SUMMARY

Subject of this work is comparison of results from conducting tests in compliance with standard ASTM G65-85. This standard determines resistance of materials to abrasion, which is a direct result of the type of a material, type of abrasive and conditions under which the tests are conducted. In this work all data conducted according to ASTM G65-85 has been processed and results are shown in tables and charts, so the data could be easily compared.

Key words: tribology, abrasion, dry sand/rubber wheel.

1. UVOD

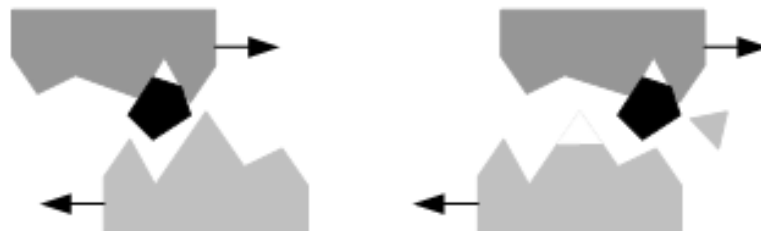
Završni rad se odnosi na usporedbu rezultata dobivenih postupkom “suhi pijesak/gumeni kotač” kojim se utvrđuje otpornost pojedinih materijala na abrazijsko trošenje.

Kad god se površine kreću jedna po drugoj, dolazi do pojave trošenja - oštećenja na jednoj ili obje površine koje najčešće podrazumijeva i progresivan gubitak materijala.

U većini slučajeva, trošenje je štetno; uzrokuje povećanu zračnost između pomičnih komponenti, neželjenu slobodu kretanja, gubitak preciznosti, često vibracije, povećano mehaničko opterećenje i još brže trošenje, te ponekad i umor materijala. Gubitak relativno male količine materijala može biti dovoljan uzrok zatajenja rada velikih i kompleksnih strojeva. Ipak, ponekad su (kao kod trenja) velika trošenja poželjna - npr. brušenje, mljevenje i poliranje koriste pojavu trenja za brzo odstranjivanje materijala u kontroliranim uvjetima, a niska razina trenja ponekad je i poželjna kod nekih procesa uhodavanja mehanizma.

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom ili česticama. Četiri osnovna mehanizma trošenja su: abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija. Sama identifikacija mehanizama trošenja se vrši na temelju izgleda trošenih površina i oblika čestica trošenja. Mehanizmi trošenja se opisuju jediničnim događajima, tj. Slijedom zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine.

Trošenje se može podijeliti na trošenje klizanja, koje se javlja bez prisustva tvrdih čestica, i abrazijsko trošenje, koje se zbiva uz njihovo prisustvo. U određenim uvjetima trošenje klizanjem može proizvesti krhotine koje uzrokuju daljnje abrazijsko trošenje. Upravo zbog toga se treba imati na umu da granica između različitih vrsta trošenja često ne može biti jednoznačno određena. [1]



Slika 1.1. Abrazijsko trošenje triju tijela [2]

2. ABRAZIJSKO TROŠENJE I METODE ISPITIVANJA OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE

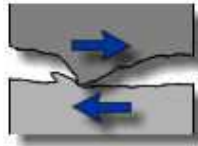
2.1. Abrazijsko trošenje

To je najučestalije trošenje u industriji. Nastaje kao posljedica prodiranja vrhova tvrdog materijala u površinske slojeve mekšeg uz brazdanje pri uzajamnom gibanju tijela.



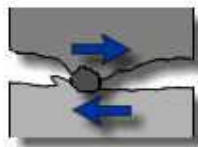
Slika 2.1. Abrazijsko trošenje [2]

Abrazivno sredstvo može biti proizvod tipa: ugljen, cement, kamen, staklo, keramika i sl. Trošenje se stoga javlja prilikom kopanja rudače, drobljenja, izvlačenja i otpremanja. Strojni dijelovi su tada izloženi visokim naprezanjima i tzv. abraziji između dva tijela. Borba protiv ove vrste trošenja zahtijeva vrlo tvrde, guste i otporne materijale za površinsku zaštitu.



Slika 2.2. Abrazija između dva tijela [2]

Abrazija između tri tijela javlja se kod uređaja kao što su pumpe ili ventili kada se abrazivno sredstvo zaglavi između površina u trenju (pr. ležajevi). I ovdje se zbog visokih naprezanja moraju koristiti čvrsti i otporni materijali.

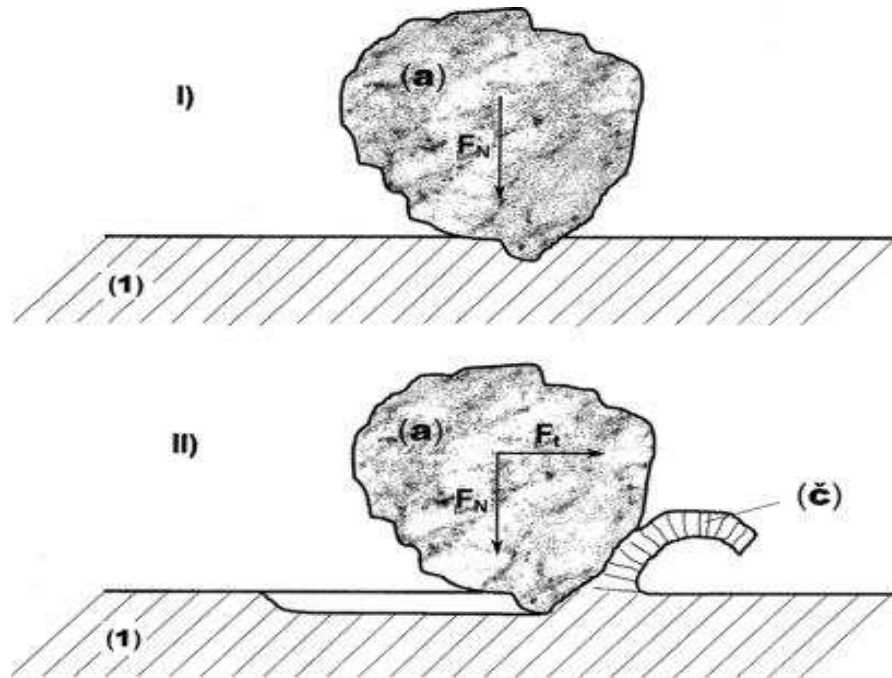


Slika 2.3. Abrazija između tri tijela [2]

Osnovna razlika između ove dvije vrste abrazijskog trošenja je u tome što abrazija između dva tijela nastaje isključivo zbog tvrdih izbočina na površinama u dodiru, dok se kod abrazije između tri tijela radi o dvije površine između kojih se tvrde abrazivne čestice slobodno kreću i uzrokuju oštećenja. [1]

2.2. Metode ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

Abrazija se može opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrijske oštrice s dvije faze jediničnog događaja



Slika 2.4. Jedinični događaj abrazije [1]

Jedinični događaj abrazije se sastoji od dvije faze od kojih je prva prodiranje abraziva u površinu materijala (1), pod utjecajem normalne komponente sile opterećenja F_N , dok je druga faza istiskivanje materijala u obliku čestice trošenja pod utjecajem tangencijalne komponente sile opterećenja F_T .

Podjela oblika abrazije se određuje prema međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala trošene površine, iz čega dobivamo da postoje tri praktična slučaja abrazije.

Prvi slučaj je “čista” abrazija, kada je tvrdoća abraziva veća od tvrdoće trošene podloge. Ako se trošena podloga sastoji od više faza tada je tvrdoća abraziva veća od tvrdoće svih faza od kojih se podloga sastoji. Posljedica toga je da je površina izbrazdana a čestice trošenja su u obliku spiralne strugotine ako je materijal duktilan, odnosno u obliku lomljene strugotine ako je materijal krhak.

Drugi slučaj je selektivna abrazija, koja nastaje kada se u materijalu trošene podloge nalazi faza koja je tvrđa od abraziva. Prilikom abrazije abraziv reže samo zahvaćeni sloj mekše faze što uzrokuje da je površina izbrazdana osim na mjestima gdje se nalaze zrna ili trake tvrde faze.

Oblici čestica trošenja su isti kao kod čiste abrazije, osim što se u njima povremeno javljaju i zrna tvrde faze, koja trošenjem meke faze gube uklještenje i bivaju izbačena iz trošene površine.

Treći slučaj je “nulta“ abrazija, koja nastaje kad je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled a čestice trošenja su sitne ljuskice koje potječu od graničnog sloja materijala. Nulta abrazija se javlja na površinskim slojevima koji su oplemenjeni različitim postupcima. [1]

2.2.1. Otpornost na abraziju

Najutjecajniji čimbenik za otpornost na abraziju je omjer tvrdoće abraziva i materijala trošene površine. Ostali utjecajni čimbenici se mogu pronaći u literaturi, a to su najčešće odnosi između najbitnijih svojstva materijala: tvrdoća materijala, mikrostruktura, udio i vrsta karbida, veličina zrna karbida, i ostali utjecajni čimbenici.

Ukoliko nije moguće eliminirati abraziju mjere za smanjivanje abrazivnog trošenja u kliznom dodiru su izbor odgovarajućeg materijala, odnosno primjena postupaka zaštite površine.

2.2.2. Popis osnovnih metoda

Za eksperimentalno određivanje otpornosti na abrazijsko trošenje postoji velik broj uređaja i metoda:

1. Metoda “suhi pijesak/ gumeni kotač” (“dry sand/ rubber wheel”) - metoda će biti detaljno opisana u nastavku završnog rada.
2. Metoda “suhi pijesak/mokri gumeni kotač” – princip rada je kao i u gore navedenoj metodi osim što se gumeni kotač može i ne mora zalijevati tekućinom
3. Metoda ispitivanja otpornosti plastike i organskih prevlaka na abraziju prema normi ASTM D1044
4. Metoda ispitivanja “wet abrasion scrub tester” prema normi ASTM D2486 kojom se ispituju otpornost na abraziju keramika, organskih prevlaka nastalih uslijed njihova čišćenja različitim četkama, spužvama ili drugim abrazivnim sredstvima
5. Metoda ispitivanja na abraziju prema normi ASTM B611, koja je jako slična metodi “suhi pijesak/ mokri kotač” osim što se kod nje kotač nalazi u posudi ispunjenoj vodom i aluminijevim oksidom, metoda se koristi za ispitivanje na abraziju tvrdih metala, keramika, metala sa otvrdnutom površinom, ojačanih čelika i sl..

Osim navedenih eksperimentalnih metoda otpornost na abraziju se može određivati i tablično, prema Indeksu otpornosti na abraziju R_{ab} . Ovaj model u obzir uzima tvrdoće prema Vickers-u pojedinih konstituanata abraziva i ispitivanog materijala te se iz tablica određuje Indeks otpornosti na abraziju R_{ab} , čija veća vrijednost daje veću otpornost na abraziju. [1]

3. METODA “SUHI PIJESAK/ GUMENI KOTAČ”

3.1. Opis metode “suhi pijesak/ gumeni kotač”

Metoda “suhi pijesak/ gumeni kotač” engl. “dry sand/ rubber wheel” određuje otpornost pojedinih materijala na abraziju, ako je glavni oblik trošenja materijala abrazija. Sama metoda se sastoji od abradiranja površine ispitivanog uzorka pijeskom određene veličine zrna i pod određenim pritiskom na samom mjestu dodira epruvete i gumenog kotača. Svrha i prednost ove metode je da se ispitivanje provodi u točno određenim uvjetima pa su rezultati dobiveni ovom metodom univerzalni i međusobno usporedivi. Svi parametri i oblik samog uređaja za provedbu pokusa se određuju prema metodi ASTM G65.

Za precizno dobivanje rezultata ispitni uzorak se važe na analitičkoj vagi prije i poslije provođenja pokusa, te se bilježi gubitak mase uzrokovan abrazijom. Rezultati se također mogu iskazivati i kao gubitak volumena u mm^3 . Ovakav način prikaza rezultata pogodan je kod materijala kod kojih je osjetna razlika u gustoći ispitivanih materijala. [3]



Slika 3.1. Uređaj za mjerenje otpornosti na abrazijsko trošenje metodom "suhi pijesak/gumeni kotač" (Laboratorij za tribologiju FSB-a) [4]

3.2. Varijante metode “suhi pijesak/ gumeni kotač“

Metoda “suhi pijesak/gumeni kotač se provodi prema standardu ASTM G-65 koji se odnosi na laboratorijski postupak za određivanje otpornosti materijala abraziji.

Ovaj standard predviđa četiri varijante postupka (A,B,C,D) koje se odabiru prema otpornosti materijala na abraziju ili prema debljini ispitnog uzorka.

Varijanta A: Ispitivanje relativno jakog intenziteta abrazivnog trošenja za rangiranje materijala od niske do visoke otpornosti abraziji. Ova varijanta pogodna je za rangiranje materijala srednje visoke do ekstremno visoke otpornosti abraziji.

Varijanta B: Kratkotrajna varijanta postupka varijante A. Ova varijanta pogodna je za rangiranje materijala srednje i niske otpornosti abraziji. Koristi se kada gubitak volumena prilikom ispitivanja prema varijanti A prelazi vrijednosti od 100 mm³.

Varijanta C: Kratkotrajna varijanta postupka varijante A koja se primjenjuje kod ispitivanja otpornosti abraziji tankih slojeva na ispitnom uzorku.

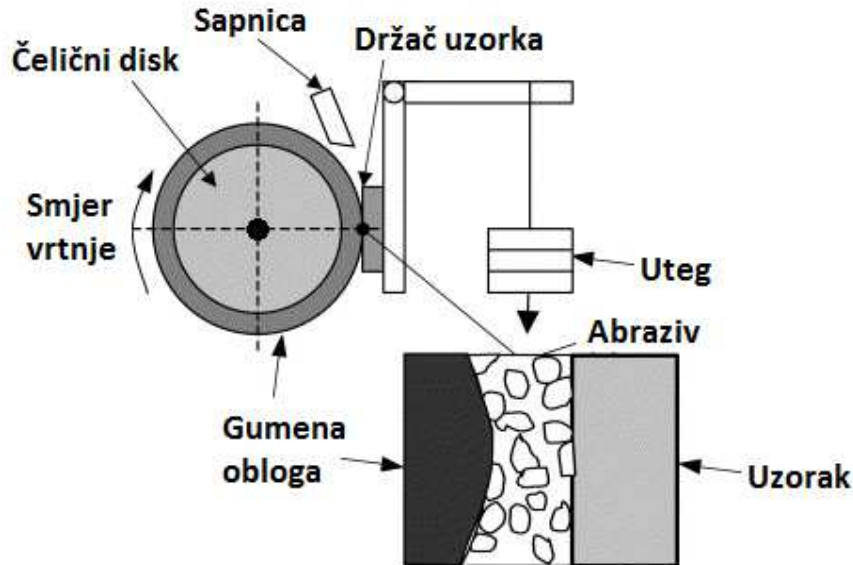
Varijanta D: Varijanta postupka A sa lakšim opterećenjem koja se koristi za rangiranje materijala niske otpornosti abraziji. [3]

Tablica 1. Značajke varijanti postupka

Varijanta postupka	Sila na epruvetu, N	Broj okretaja kotača, okr	Relativni put, m	Vrijeme trajanja postupka, min
A	130	6000	4309	30
B	130	2000	1436	10
C	130	100	71,8	1/2
D	45	6000	4309	30

3.3. Uređaj za provedbu metode “suhi pijesak/ gumeni kotač”

Na slici 2.4 je prikazan klasična konstrukcija uređaja za provedbu metode “suhi pijesak/gumeni kotač”.



Slika 3.2. Shematski prikaz uređaja za test “suhi pijesak/ gumeni kotač” [5]

3.3.1. Gumeni kotač

Gumeni kotač se sastoji od kotača obloženog gumom čija tvrdoća iznosi oko 60 Shore A, dopušta se vrijednost od 58-62 Shore A. Mjerenje tvrdoće se mora provesti na najmanje četiri mjesta na gumenom kotaču, tj. Pod kutom od 90° na vanjskom polumjeru kotača. [3]

3.3.2. Abraziv

Abraziv koji se koristi u metodi je zaobljeni kvarcni pijesak Ottawa AFS 50/70. Udio vlage u pijesku ne smije prelaziti 0.5 % masenog udjela, jer bi u suprotnom došlo da pogrešnih konačnih vrijednosti testa. Ako se u pijesku nalazi veći udio vlage od dopuštenog pijesak treba zagrijati na temperaturu od 100 °C i na toj temperaturi ga držati minimalno 1h. Ako je i nakon toga udio vlage prevelik postupak treba ponoviti. Ako se pijesak nalazi u prostoriji sa puno vlage onda ga treba skladištiti u posebnim prostorijama sa konstantnom temperaturom i količinom vlage, zatvorenim kutijama sa žaruljom, ili u pećima za sušenje elektroda za zavarivanje. Višestruka upotreba pijeska može utjecati na rezultate i zato se ne preporučuje.

Veličina zrna ima utjecaja na veličinu trošenja u slučaju kada je tvrdoća abrasiva veća od tvrdoće materijala koji se troši. Kod vrlo sitnih abrazivnih čestica (prašina) trošenje je vrlo veliko. Kod većih zrnaca trošenje naglo pada da bi se daljnjim povećanjem zrna ponovno

počelo rasti do određene veličine zrna nakon čega veličina zrna uglavnom ne utječe na trošenje. Kod abraziva koji su mekši od materijala koji se troši veličina čestica abraziva nema skoro nikakvog utjecaja na veličinu trošenja.

Oblik zrna abraziva je od velikog značenja jer se abrazivna zrna mogu smatrati kao manje ili više oštri noževi. Nepravilno uglati oblik zrna odnosi više osnovnog materijala nego zaobljeni oblik.

Količina abraziva djeluje kod raznih osnovnih materijala različito u odnosu o adheziji između abraziva i materijala koji se troši. Kod nekih materijala trošenje raste sa količinom abraziva, a kod nekih uglavnom ostaje isto ili čak kod određenih količina opada. [3]

3.3.3. Mlaznica za pijesak

Mlaznica treba biti oblikovana tako da daje točan protok pijeska i pravilno istjecanje pijeska kako je potrebno za ispravno ispitivanje. Duljina mlaznice može biti bilo koja pod uvjetom da omogućuje povezivanje sa lijevkom za pijesak preko plastičnog crijeva. Za vrijeme rada, otvor mlaznice treba biti toliko blizu dodirne površine ispitnog uzorka i gumenog kotača koliko je to konstrukcijski moguće.

Za izradu mlaznice preporuča se upotreba šavne ili bešavne cijevi od nehrđajućeg čelika kako bi se omogućilo lakše zavarivanje i otpornost na koroziju. Također se uspješno koristi i cijev od čelika ili bakra. Istjecanje treba biti laminarno, a oblik struje iz mlaznice uzak. Pijesak treba prolaziti između ispitnog uzorka i gumenog kotača.

Protok abraziva kod novijih mlaznica podešava se veličinom otvora sapnice te iznosi 250 do 350 g/min. [3]

3.3.4. Pogonski motor

Kotač je pogonjen elektromotorom nominalne snage 0,7 kW (1 KS) preko zupčastog prijenosnika prijenosnog omjera 1/10. Ovakav prijenosni omjer osigurava konstantan moment prilikom opterećenja. Brzina okretanja je približno 200 o/min ± 10 okretaja te mora biti konstantna pod opterećenjem.

Pogon mora biti opremljen sa brojačem okretaja motora koji osigurava broj okretaja potreban za pojedinu varijantu postupka ispitivanja. Nakon zadanog broja okretaja kotača uređaj mora omogućiti automatsko isključivanje pogona uređaja. [3]

3.3.5. Držać ispitnog uzorka i momentna poluga

Držać ispitnog uzorka je učvršćen na koljenastu polugu koja se na dužem kraku opterećuje utezima radi postizanje normalne sile na kontaktnu površinu ispitnog uzorka. Utezi moraju biti takvi da omogućuju postizanje odgovarajućih sila između ispitnog uzorka i kotača. [3]



Slika 3.3. Držać uzorka na momentnoj poluzi [6]

3.3.6. Analitička vaga

Vaga za određivanje gubitka mase ispitnog uzorka mora imati osjetljivost od 0,001 g, osim varijante C kod koje se zahtjeva osjetljivost od 0,0001 g. [3]



Slika 3.4. Vaga Metler B5C 1000 [4]

3.4. Priprema uzoraka i uzrokovanje

Ovim postupkom radi se ispitivanje uzoraka različitih materijala, a to su: metali, ljevovi, navari, slojevi (različite obrade površine metala), keramike.

Tip materijala uvjetuje veličinu ispitnog uzorka. Normalna epruveta ima ispitnu površinu dimenzija 25 x 75 mm, a debljina joj iznosi od 3,2 do 12,7 mm. Dimenzije se mogu mijenjati prema potrebama korisnika s tim da ispitna površina uzorka uvijek mora biti veća od širine gumenog kotača. Površina ispitnog uzorka treba biti unutar tolerancije neravnina od maksimalno 0,125 mm.

Kod ispitivanja navara, ispitni uzorak mora biti ravna izbrušena površina od najmanje 63,4 x 19,1 mm.

Površinska obrada uzorka mora biti glatka, ravna i dovoljno velika. Ukoliko je površina porozna i hrapava ona može utjecati na rezultate ispitivanja, te ukoliko se ne ispituje sama površina takve ispitne uzorke je potrebno izbjegavati. [3]



Slika 3.5. Primjeri testnog uzorka nakon ispitivanja [2]

3.5. Postupak provođenja ispitivanja

Svaki pojedini ispitni uzorak je potrebno prije ispitivanja očistiti od nečistoća i izvagati da bi se postigli točni rezultati. Čelične ispitne uzorke koji su magnetizirani potrebno je demagnetizirati ili ako to nije moguće ne trebaju se koristiti.

Ispitni uzorak potrebno je učvrstiti na ispitno mjesto uređaja. Nakon toga potrebno je postaviti utege da bi ostvarili potrebnu silu na mjestu dodira ispitnog uzorka i gumenog kotača.

Do početka ispitivanja uzorak mora biti odvojen od gumenog kotača. Također je prije početka ispitivanja potrebno podesiti brojač okretaja na vrijednost zadanu prema varijanti postupka koji se provodi.

Nakon postizanja jednoličnog mlaza abraziva pokreće se gumeni kotač te se ispitni uzorak stavlja u zahvat.

Ponavljanje postupka se odvija nakon što se gumeni kotač ohladi na sobnu temperaturu.

Nakon završetka testa uzorak se skida sa ispitnog mjesta i važe, te se računa vrijednost gubitka mase ili volumena ispitnog uzorka.

Potrošeni dio uzorka se pregledava sa svrhom provjere ispravnosti nalijeganja gumenog kotača na sami uzorak radi točnosti dobivenih rezultata, trag mora biti ravnomjeran i jednoličan.

Nakon provođenja nekoliko ispitnih procedura potrebno je provjeriti koncentričnost čeličnog diska i osovine na kojoj se nalazi.

Gumeni kotač nakon svakog ispitivanja treba vizualno pregledati kako bi se uočila eventualna površinska oštećenja ili istrošenost koja bi utjecala na konačne rezultate ispitivanja. [3]

3.6. Računanje i obrada rezultata ispitivanja

Rezultate je potrebno izraziti kao gubitak volumena u kubičnim milimetrima radi izbjegavanja zabune zbog različitih vrijednosti gustoća materijala.

Formula za izračun gubitka volumena je:

$$\text{Gubitak volumena, mm}^3 = \frac{\text{gubitak mase ispitnog uzorka, g}}{\text{gustoća materijala ispitnog uzorka, } \frac{\text{g}}{\text{mm}^3}} \cdot 1000$$

Zbog smanjenja promjera gumenog kotača smanjuje se i relativni put klizanja između kotača i uzorka. Smanjenje promjera kotača utječe na konačni rezultat smanjenja volumena uzorka.

Zbog toga potrebno je izračunati korigirani gubitak volumena (KGV) koji uzima u obzir smanjenje ukupnog puta kotača po uzorku te samim time i količine abrazivnog djelovanja na ispitni uzorak. Korigirani gubitak volumena uzima to u obzir i daje rezultat kakav bi se dobio upotrebom novog kotača promjera 228,6 mm.

$$\text{KGV} = \text{izmjereni gubitak volumena} \cdot \frac{228,6}{D_1}$$

Gdje je:

D_1 - promjer kotača nakon upotrebe.

Svi dobiveni rezultati zapisuju se u tablicu s rezultatima. Sva odstupanja od uobičajenih rezultata moraju biti zabilježena u komentarima rezultata ispitne procedure. [3]

4. USPOREDBA REZULTATA ISPITIVANJA

4.1. Rezultati ispitivanja etilen metakril kopolimera

Rezultati ispitivanja 01 odnose se na ispitivanja provedena u [7]. Predmet proučavanja je polimerna smjesa kojoj je kemijska osnova **99 % etilen metakril kopolimer**. Uporaba ovog materijala je najčešće kod površina izloženih ekstremnim trošenjima. Osnovna svojstva su mu stabilna površinska zaštita, čvrstoća i lagana obrada.

Ispitivanje je provedeno na četiri jednaka uzorka prema modificiranoj varijanti ispitivanja D (1000 okretaja).

Tablica 2. Rezultati ispitivanja 01-1

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>Gubitak volumena, mm³</i>
1	10,7668	10,7592	0,0076	8,137
2	11,1166	11,1093	0,0073	7,816
3	9,9748	9,9680	0,0068	7,816
4	11,4005	11,3891	0,0116	12,420
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,008325	9,04725

4.2. Rezultati ispitivanja željeznih lijevova, tvrdog metala i bazalta

Rezultati ispitivanja 02 odnose se na ispitivanja provedena u [8]. Predmet proučavanja su bila četiri materijala.

Prvi materijal je **sivi lijev** kemijskog sastava: 3,65 % C, 0,37 % Mn, 2,1 % Si, 0,22 % P, 0,055 % Cr, 0,58 % Cu.

Drugi materijal je **nodularni lijev** kemijskog sastava: 2,73% C, 0,31 % Mn, 2,91 % Si, 0,10 % P, 0,050 % Cr, 0,047 % Cu.

Treći materijal je **tvrdi metal** kemijskog sastava: 90 % monokarbid volframa (WC), 10 % Co.

Četvrti materijal je **bazalt**, materijal nastao iz vruće vulkanske lave prije nekoliko milijuna godina. Glavna svojstva bazalta su: otpornost protiv trošenja, velika otpornost na pritisak, velika otpornost na atmosferske utjecaje, otpornost na kiseline i elektroizolacijska otpornost.

Kemijski sastav (u postocima mase) mu je: 44,81 % SiO₂, 1,95 % TiO₂, 11,44 % Al₂O₃,

11,6 % Fe₂O₃, 7,87 % FeO, 10,21 % CaO, 3,20 % Na₂O, 1,46 % K₂O, 0,49 % H₂O, 2,17 % H₂O⁺, 1,19 % P₂O₅.

Ispitivanje je rađeno prema D varijanti postupka, i za svaki postupak je izračunat KGV. Ispitivanje je za svaki materijal vršeno na dva uzorka.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja 02- 01 Sivi lijev

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>Gubitak volumena, mm³</i>	<i>KGV,mm³</i>
1	145,6808	145,0586	0,6222	85,821	259,162
2	145,0586	144,5134	0,5452	75,2	227,09
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,5837	80,5105	243,126

Tablica 4. Rezultati ispitivanja 02- 02 Nodularni lijev

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>Gubitak volumena, mm³</i>	<i>KGV,mm³</i>
1	143,7610	143,4914	0,2696	37,186	112,294
2	143,4914	142,9815	0,5099	70,331	212,386
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,38975	53,758	162,340

Tablica 5. Rezultati ispitivanja 02- 03 Tvrdi metal

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>Gubitak volumena, mm³</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	185,0698	185,0374	0,0324	3,6	10,871
2	188,1054	188,0764	0,0290	3,22	9,73
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,0307	3,41	10,3

Tablica 6. Rezultati ispitivanja 02- 04 Bazalt

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>Gubitak volumena, mm³</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	27,7491	27,5569	0,1922	66,275	200,138
2	27,5569	27,3819	0,1750	60,345	182,231
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,1836	63,31	191,185

4.3. Rezultati ispitivanja cementiranog i boriranog sloja

Rezultati ispitivanja 03 odnose se na ispitivanja provedena u [9]. Predmet proučavanja je **segmentni štapić plašta preše**. Prva dva uzorka su cementirana do dubine 0,5 mm na tvrdoću 55 HRC, a druga tri uzorka su dobivena rezanjem **segmentnog štapića preše sa boriranom površinom**.

Postupak provođenja ispitivanja je modificiran i sila tijekom ispitivanja iznosi 45 N, a broj okretaja iznosi 2000, s tim da je prvo mjerenje izvršeno nakon 1000 okretaja, nakon čega se postupak nastavlja i radi se konačno mjerenje nakon sveukupnih 2000 okretaja.

Tablica 7. Rezultati ispitivanja 03- 01 Cementirana površina

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, 1000okr, g</i>	<i>Gubitak mase, 2000okr, g</i>
1	173,8071	173,7255	0,0493	0,0816
2	176,5893	176,5124	0,0459	0,0769
Srednja vrijednost gubitka mase:			0,0476	0,0792

Tablica 8. Rezultati ispitivanja 03- 02 Borirana površina

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, 1000okr, g</i>	<i>Gubitak mase, 2000okr, g</i>
1	110,0356	110,0234	0,0083	0,0122
2	107,3401	107,3291	0,0080	0,011
3	130,7340	130,7210	0,0105	0,013
Srednja vrijednost gubitka mase:			0,0089	0,0120

4.4. Rezultati ispitivanja aluminijskog oksida, polimerne prevlake i mjedi

Rezultati ispitivanja 04 odnose se na ispitivanja provedena u [6]. Predmet proučavanja su bila četiri materijala.

Prvi ispitivani materijal je **oksidna tehnička keramika Al_2O_3** , nanešena na osnovni uzorak, koja se odlikuje visokom čvrstoćom, tvrdoćom i dobrom otpornosti prema abrazijskom trošenju.

Drugi ispitivani materijal je **tehnička keramika Al_2O_3 presvučena slojem fosfata**, koji povećavaju otpornost trošenju, koroziji i visokoj temperaturi.

Treći ispitivani materijal je **termoplastična zaštitna prevlaka TPC** (Thermo Plastic Coating)**prah tipa AU 111**. Ova prevlaka se odlikuje visokom čvrstoćom i tvrdoćom, te dobrom otpornošću na koroziju, trenje i trošenje.

Četvrti ispitivani materijal je **mjed**.

Kod ispitivanja nije korišten standardni abraziv prema ASTM G 65-85, nego je korištena kalupna mješavina koja se sastoji od pijeska i nakvašenog veziva. Pijesak je kvarcni (SiO_2), a vezivo je glina.

Ispitivanje svakog materijala je izvršeno na dva uzorka.

Sila tijekom ispitivanja je iznosila 130 N, a broj okretaja 500.

Tablica 9. Rezultati ispitivanja 04- 01 Al_2O_3

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	131,4873	131,1282	0,0115	2,8890
2	133,9890	133,9833	0,0057	1,4320
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,0086	2,1605

Tablica 10. Rezultati ispitivanja 04- 02 Al_2O_3 sa fosfatima

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	133,2118	133,2004	0,0144	3,6181
2	134,9712	134,9611	0,0101	2,5376
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,01225	3,07785

Tablica 11. Rezultati ispitivanja 04- 03 TPC

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	10,4873	10,2906	0,1967	210,5996
2	10,2906	10,0077	0,2829	302,8910
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,2398	256,7453

Tablica 12. Rezultati ispitivanja 04- 04Mjed

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	339,4589	338,1116	1,3473	151,380
2	338,1116	336,3455	1,7661	198,4381
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			1,5567	174,909

4.5. Rezultati ispitivanja kaljenog čelika i bijelog lijeva

Rezultati ispitivanja 05 odnose se na ispitivanja provedena u [7]. Predmet ispitivanja su bila dva materijala.

Prvi materijal je **Č.1730** (EN C60), kaljen, kemijskog sastava: 0,61 % C, 0,75 % Mn, 0,23-0,35 % Si, 0,045 % P_{max} i S_{max}.

Drugi materijal je **bijeli lijev**, kemijskog sastava: 2,5 % C, 3 % Mo, 15 % Cr. Bijeli lijev je ispitivanu četiri stanja: lijevan, kaljen, boriran, vanadiran.

Kod ispitivanja nije korišten standardni abraziv prema ASTM G 65-85, nego su korištena dva abraziva sličnih svojstava:

- kvarcni pijesak "Vršac" veličine zrna 0,200 - 0,315 mm
- mljeveno ambalažno staklo - Jugokeramika veličine zrna 0,200 - 0,315 mm.

Ispitivanje je rađeno modificiranom varijantom postupka A gdje je broj okretaja 1000.

Tablica 13. Rezultati ispitivanja 05- 01 čelika EN C60 - pijesak

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	144,1741	143,7829	0,3912	302,9
2	143,7829	143,6128	0,1699	131,5
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,28055	217

Tablica 14. Rezultati ispitivanja 05- 02 čelika EN C60 - staklo

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	143,6128	143,5935	0,0193	14,94
2	143,5939	143,5864	0,0075	5,81
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,0134	10,38

Tablica 15. Rezultati ispitivanja 05- 03 Bijeli lijev, lijevan - pijesak

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	161,6481	161,5876	0,0605	46,85
2	161,5877	161,5445	0,0432	33,45
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,05185	40,15

Tablica 16. Rezultati ispitivanja 05- 04 Bijeli lijev, lijevan - staklo

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	161,5449	161,5270	0,0179	13,86
2	161,5295	161,5186	0,0109	8,44
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,0144	11,15

Tablica 17. Rezultati ispitivanja 05- 05 Bijeli lijev, kaljen - pijesak

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	157,5758	157,5366	0,039	30,198
2	157,5368	157,4989	0,0379	29,35
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,03845	29,77

Tablica 18. Rezultati ispitivanja 05- 06 Bijeli lijev, kaljen - staklo

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	157,4994	157,4889	0,0105	8,13
2	157,4906	157,4832	0,0074	5,73
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,00895	6,93

Tablica 19. Rezultati ispitivanja 05- 07 Bijeli lijev, boriran - pijesak

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	162,4721	162,4609	0,0112	8,67
2	162,4611	162,4508	0,0103	7,98
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,01075	8,33

Tablica 20. Rezultati ispitivanja 05- 08 Bijeli lijev, boriran - staklo

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	162,4512	162,4356	0,0156	12,08
2	162,4365	162,4272	0,0093	7,2
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,01245	9,64

Tablica 21. Rezultati ispitivanja 05- 09 Bijeli lijev, vanadiran - pijesak

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	162,4216	162,3748	0,0468	36,24
2	162,3748	162,3472	0,0276	21,37
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,0372	28,8

Tablica 22. Rezultati ispitivanja 05- 10 Bijeli lijev, vanadiran - staklo

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	162,3477	162,3365	0,0112	8,67
2	162,3370	162,3300	0,007	5,47
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,0091	7,05

4.6. Rezultati ispitivanja kaljenog čelika, bijelog lijeva i nehrđajućeg austenitnog čelika

Rezultati ispitivanja 06 odnose se na ispitivanja provedena u [12]. Predmet ispitivanja su bila tri materijala.

Prvi materijal je čelik **Č.1730** (EN C60), kaljen, kemijskog sastava: 0,61 % C, 0,75 % Mn.

Drugi materijal je **bijeli lijev**, kemijskog sastava: 2,5 % C, 3 % Mo, 15 % Cr. Bijeli lijev je ispitivanu četiri stanja: lijevan, kaljen, boriran, vanadiran.

Treći materijal je **nehrđajući austenitni čelik**.

Kod ispitivanja nije korišten standardni abraziv prema ASTM G65 - 85, nego su korištena tri abraziva sličnih svojstava:

- kvarcni pijesak "Vršac" veličine zrna 0,200 - 0,315 mm
- mljeveno ambalažno staklo - Jugokeramika veličine zrna 0,200 - 0,315 mm
- kalcit, Rudnik kaolina i kalcita Kamnik veličine zrna 0,200 - 0,315 mm

Ispitivanje je rađeno modificiranom varijantom postupka A gdje je broj okretaja 200.

Tablica 23. Rezultati ispitivanja 06- 01 Nehrđajući austenitni čelik, pijesak

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	128,9549	128,7389	0,2160	834,7859
2	133,4177	133,1870	0,2307	891,5973
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,22335	863,1916

Tablica 24. Rezultati ispitivanja 06- 02 Nehrđajući austenitni čelik, staklo

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	129,1185	128,9540	0,1645	635,7502
2	133,5376	133,4182	0,1194	461,4515
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,14195	548,6008

Tablica 25. Rezultati ispitivanja 06- 03 Nehrđajući austenitni čelik, kalcit

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	133,1870	133,1860	0,1282	3,8646
2	133,1860	133,1853	0,0897	2,7040
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,10895	3,2843

Tablica 26. Rezultati ispitivanja 06- 04 čelika EN C60 - pijesak

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	149,3087	149,1707	0,1320	510,1478
2	164,1628	164,0451	0,1177	454,8798
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,12485	482,5138

Tablica 27. Rezultati ispitivanja 06- 05 čelika EN C60 - staklo

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	149,3242	149,3188	0,0054	20,8694
2	149,3188	149,3129	0,0059	22,6923
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,00565	21,7808

Tablica 28. Rezultati ispitivanja 06- 06 čelika EN C60 - kalcit

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	164,0452	164,0434	0,0018	6,9575
2	164,0434	164,0421	0,0013	5,02222
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,00155	5,98985

Tablica 29. Rezultati ispitivanja 06- 07 Bijeli lijev, lijevan - pijesak

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	161,6857	161,6710	0,0147	58,8114
2	161,6710	161,6638	0,0072	27,8269
3	161,6638	161,6570	0,0068	26,2805
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,00956	36,9729

Tablica 30. Rezultati ispitivanja 06- 08 Bijeli lijev, kaljen - pijesak

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	157,6033	157,5893	0,0140	54,1074
2	157,5893	157,5838	0,0055	21,2553
3	157,5838	157,5787	0,0051	19,7088
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,0082	31,6905

Tablica 31. Rezultati ispitivanja 06- 09 Bijeli lijev, vanadiran - pijesak

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	162,4861	162,4780	0,0081	31,3026
2	162,4780	162,4722	0,0058	22,4159
3	162,4722	162,4666	0,0056	21,6411
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,0065	25,1198

Tablica 32. Rezultati ispitivanja 06- 10 Bijeli lijev, boriran - pijesak

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	162,5217	162,5103	0,0114	44,0570
2	162,5103	162,5051	0,0052	20,0947
3	162,5051	162,4890	0,0161	27,4410
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,0109	30,5309

Tablica 33. Rezultati ispitivanja 06- 11 Bijeli lijev, lijevan- staklo

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	161,6581	161,6519	0,0062	23,9623
2	161,6519	161,6460	0,0059	22,6938
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,00605	23,3273

Tablica 34. Rezultati ispitivanja 06- 12 Bijeli lijev, kaljen - staklo

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	157,5796	157,5753	0,0043	16,6189
2	157,5753	157,5702	0,0051	19,6154
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,0047	18,1171

Tablica 35. Rezultati ispitivanja 06- 13 Bijeli lijev, vanadiran - staklo

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	162,4711	162,4650	0,0061	23,5764
2	162,4650	162,4605	0,0045	17,3077
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,0053	20,4421

Tablica 36. Rezultati ispitivanja 06- 14 Bijeli lijev, boriran - staklo

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	162,4996	162,4920	0,0076	29,3733
2	162,4920	162,4896	0,0024	9,2307
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,005	19,302

4.7. Rezultati ispitivanja sinteriranog tvrdog metala i alatnog čelika

Rezultati ispitivanja 07 odnose se na ispitivanja provedena u [13]. Predmet ispitivanja su bila tri materijala.

Prvi materijal je **sinterirani tvrdi metal na bazi TiC**, kemijskog sastava: 90 % TiC, 10 % Ni + Mo.

Drugi materijal je **sinterirani tvrdi metal na bazi WC**, kemijskog sastava: 74,3 % WC, 8,8 % Co, 15% TiC, 2 % TaC (NbC).

Treći materijal je **sinterirani alatni čelik (ASP 30)**, kemijskog sastava: 1,3 % C, 4,2 % Cr, 6,4 % W, 5,0 % Mo, 3,1 % V, 8,5 % Co.

Ispitivanje je rađeno pri 1000 okretaja.

Tablica 37. Rezultati ispitivanja 07- 01 Tvrdi metal na bazi TiC

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	96,0190	95,989	0,03

Tablica 38. Rezultati ispitivanja 07- 02 Tvrdi metal na bazi WC

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	155,2020	155,1665	0,0355

Tablica 39. Rezultati ispitivanja 07- 03 Sinterirani alatni čelik

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	141,5141	141,4721	0,042

4.8. Rezultati ispitivanja općeg konstrukcijskog čelika, čelika za poboljšavanje i HARDOX-a

Rezultati ispitivanja 08 odnose se na ispitivanja provedena u [2]. Predmet ispitivanja su bila tri materijala.

Prvi materijal je **HARDOX 450**, čelična ploča razvijena od SSAB-a. Odlikuje se velikom otpornošću na trošenje, velikom čvrstoćom, visokom tvrdoćom i izvrsnom žilavosti.

Drugi materijal je **čelik za poboljšavanje EN C45**, (DIN C45, HRN Č 1530), kemijskog sastava: 0,45 % C, 0,75 % Mn.

Treći materijal je **čelik za nosive konstrukcije St52-3** (EN S355, HRN Č 0562), kemijskog sastava: 0,2 % C, 1,6 % Mn, 0,55% Si.

Ispitivanje je izvršeno pri opterećenju od 130 N te uz 500 okretaja kotača.

Tablica 40. Rezultati ispitivanja 07- 01 HARDOX 450

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	115,0330	114,8573	0,1757
2	114,8572	114,656	0,2012
Srednja vrijednost gubitka mase:			0,18845

Tablica 41. Rezultati ispitivanja 07- 02 Čelik EN C45

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	118,4332	118,2340	0,1992
2	118,2355	118,036	0,1995
Srednja vrijednost gubitka mase:			0,19935

Tablica 42. Rezultati ispitivanja 07- 03 Čelik EN S355

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	118,4332	118,2340	0,1716
2	118,2355	118,036	0,1654
Srednja vrijednost gubitka mase:			0,1685

4.9. Rezultati ispitivanja nodularnog lijeva

Rezultati ispitivanja 09 odnose se na ispitivanja provedena u [6].

Predmet ispitivanja je **nodularni lijev** približnog kemijskog sastava: 3,3-3,4 % C, 2,2-2,8 % Si, 0,1-0, % Mn, 0,005-0,04 % S, 0.03-0,05 % Mg, ostatak čini Fe.

Ispitivanje je provedeno za svaku varijantu postupka, A,B,C,D, na tri uzorka.

Tablica 43. Rezultati ispitivanja 09-01 Nodularni lijev, postupak A

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>Gubitak volumena, mm³</i>
1	128,9122	128,0431	0,8691	124,6915
2	128,9615	128,1233	0,8382	120,2582
3	128,2476	127,1866	1,061	152,2238
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,92276	132,3912

Tablica 44. Rezultati ispitivanja 09-02 Nodularni lijev, postupak B

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>Gubitak volumena, mm³</i>
1	128,6720	128,3652	0,3068	44,0172
2	128,0857	128,7902	0,2955	42,3960
3	129,1260	128,8147	0,3113	44,6628
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,30453	43,692

Tablica 45. Rezultati ispitivanja 09-03 Nodularni lijev, postupak C

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>Gubitak volumena, mm³</i>
1	128,2703	128,2416	0,0287	4,1176
2	129,1160	129,0881	0,0279	4,0029
3	128,5782	128,5492	0,0290	4,1607
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,02853	4,09373

Tablica 46. Rezultati ispitivanja 09-04 Nodularni lijev, postupak D

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>Gubitak volumena, mm³</i>
1	127,9815	127,7908	0,1907	27,3601
2	128,4186	128,2347	0,1839	26,3845
3	129,6799	129,5379	0,1420	20,3730
Srednja vrijednost gubitka mase i volumena:			0,1722	24,7058

4.10. Rezultati ispitivanja čelika za poboljšavanje i nitridnog sloja

Rezultati ispitivanja 10 odnose se na ispitivanja provedena u [5].

Predmet ispitivanja su dva čelika za poboljšavanje, te ti isti čelici naknadno nitrirani.

Prvi materijal je čelik **Č 4732** (EN CrMo4) kemijskog sastava: 0,38 - 0,45% C, 0,15 - 0,40 % Si, 0,50 - 0,80 % Mn, 0,90 - 1,2 % Cr, 0,15 - 0,30 % Mo, max 0,035 % P, max 0,035 % S.

Drugi materijal je čelik **Č 5432** (EN 30CrNiMo8) kemijskog sastava: 0,32 - 0,40% C, 0,15 - 0,40 % Si, 0,50 - 0,80 % Mn, 1 - 2 % Cr, 0,15 - 0,30 % Mo, 1 - 2% Ni, max 0,035 % P, max 0,035 % S.

Ispitivanje je provedeno varijantama B i C, te modificiranoj varijanti D gdje je broj okretaja 500.

Tablica 47. Rezultati ispitivanja 10- 01 Čelik EN CrMo4 Varijanta B

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,2428
2	0,2304
Srednja vrijednost gubitka mase:	
0,2366	

Tablica 48. Rezultati ispitivanja 10- 02 Čelik EN CrMo4 nitiran Varijanta B

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,2257

Tablica 49. Rezultati ispitivanja 10- 03 Čelik EN CrMo4 Varijanta C

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,0201
2	0,0207
Srednja vrijednost gubitka mase: 0,0204	

Tablica 50. Rezultati ispitivanja 10- 04 Čelik EN CrMo4 nitriran Varijanta C

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,0226

Tablica 51. Rezultati ispitivanja 10- 05 Čelik EN 30CrNiMo8 Varijanta B

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,2498
2	0,2420
Srednja vrijednost gubitka mase: 0,2459	

Tablica 52. Rezultati ispitivanja 10- 06 Čelik EN 30CrNiMo8 nitriran Varijanta B

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,2625

Tablica 53. Rezultati ispitivanja 10- 07 Čelik EN 30CrNiMo8 Varijanta C

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,0178
2	0,0109
Srednja vrijednost gubitka mase: 0,01435	

Tablica 54. Rezultati ispitivanja 10- 08 Čelik EN 30CrNiMo8 nitriran Varijanta C

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,0249

Tablica 55. Rezultati ispitivanja 10- 09 Čelik EN CrMo4 Varijanta D, mod

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,0247

Tablica 56. Rezultati ispitivanja 10- 11 Čelik EN CrMo4 nitriran Varijanta D, mod,

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,0208

Tablica 57. Rezultati ispitivanja 10- 11 Čelik EN 30CrNiMo8 Varijanta D, mod

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,0253

Tablica 58. Rezultati ispitivanja 10- 12 Čelik EN 30CrNiMo8 Varijanta D, mod, nitriran

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,0236

4.11. Rezultati ispitivanja austenitnih čelika

Rezultati ispitivanja 11 odnose se na ispitivanja provedena u [14].

Predmet ispitivanja su sedam materijala.

Prvi materijal je **čelik 316 L** (oznaka prema AISI, oznaka prema DIN: X2CrNiMo18 12) kemijskog sastava: 0,03% C, 0,4 - 0,6 % Si, 1,5 - 2 % Mn, 16 - 18 % Cr, 10 - 14 % Ni, 2 - 3 % Mo (uzorak 1).

Drugi materijal je **čelik X2NiCrMoCu 25 20 5** (oznaka prema DIN) kemijskog sastava: 0,02 % C, 1,0 % Si, 1,0 % Mn, 19 - 22 % Cr, 24 - 27 % Ni, 4 - 4,8 % Mo, 1 - 2 % Cu (uzorak 2).

Treći materijal je **čelik 310 1 mod** (oznaka prema AISI, oznaka prema DIN: X2CrNiMoN25 22) kemijskog sastava: 0,02 % C, 0,04 % Si, 1,5 - 2 % Mn, 24 - 26 % Cr, 21 - 23 % Ni, 2 - 2,3 % Mo, 0,12 % N (uzorak 3).

Četvrti materijal je **čelik 316** (+Ti) (oznaka prema AISI, oznaka prema DIN: X10CrNiMoTi 18 10) kemijskog sastava: 0,1 % C, 1,0 % Si, 2,0 % Mn, 17-18 % Cr, 10 - 12 % Ni, 2 - 2,5 % Mo, Ti 5xC (uzorak 4).

Peti materijal je **čelik 321** (oznaka prema AISI, oznaka prema DIN: X10CrNiTi18 9) kemijskog sastava: 0,1 % C, 0,1 % Si, 2,0 % Mn, 17 - 18 % Cr, 9 - 10 % Ni, Ti 5xC (uzorak 5).

Šesti materijal je **čelik 310 L** (oznaka prema AISI, oznaka prema DIN: X15CrNiSi25 20) kemijskog sastava: 0,2 % C, 2,0 % Si, 2,0 % Mn, 24 - 25 % Cr, 19 - 20 % Ni (uzorak 6).

Sedmi materijal je **čelik 347** (oznaka prema AISI, oznaka prema DIN: X8CrNiNb 16 13) kemijskog sastava: 0,06 % C, 0,4 % Si, 1,5 - 2 % Mn, 14 - 16 % Cr, 11 - 13 % Ni, Nb 10xC (uzorak 7).

Ispitivanje je rađeno prema B varijanti postupka.

Tablica 59. Rezultati ispitivanja 11 [13]

<i>Uzorak</i>	<i>Početna masa uzorka, g</i>	<i>Masa nakon ispitivanja, g</i>	<i>Gubitak mase, g</i>	<i>Gubitak volumena, mm³</i>	<i>KGV, mm³</i>
1	130,2298	129,8372	0,3926	50,33	51,36
2	132,3187	131,9698	0,3489	44,73	45,65
3	65,8062	65,4683	0,3379	43,32	44,21
4	129,2123	128,7760	0,4363	55,94	57,09
5	130,5192	130,0204	0,4952	63,49	64,79
6	130,0640	129,5524	0,5116	65,59	66,94
7	65,5401	64,0840	0,4561	60,01	61,24

4.12. Rezultati ispitivanja poboljšanih, nitriranih i tvrdo kromiranih čelika

Rezultati ispitivanja 12 odnose se na ispitivanja provedena u [1].

Predmet ispitivanja su tri materijala.

Prvi materijal je **čelik EN C45** (oznaka prema HRN: Č 1530).

Drugi materijal je **čelik EN 25CrMo4** (oznaka prema HRN Č 4730).

Treći materijal je **čelik EN 36CrNiMo4** (oznaka prema HRN Č 5430).

Nad svakim od čelika su provedene sljedeće toplinske obrade: poboljšavanje, nitriranje, tvrdo kromiranje.

Ispitivanje je rađeno pri opterećenju od 130 N i pri 1000 okretaja.

Tablica 60. Rezultati ispitivanja 12- 01 Čelik EN C45 poboljšan

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,1625
2	0,1464
3	0,1544
4	0,1472
Srednja vrijednost gubitka mase:	0,1526

Tablica 61. Rezultati ispitivanja 12- 02 Čelik EN C45 nitriran

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,1750
2	0,1644
3	0,1658
4	0,1664
Srednja vrijednost gubitka mase:	0,1679

Tablica 62. Rezultati ispitivanja 12- 03 Čelik EN C45 tvrdo kromiran

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,1552
2	0,1501
3	0,1547
4	0,1530
Srednja vrijednost gubitka mase: 0,1533	

Tablica 63. Rezultati ispitivanja 12- 04 Čelik EN 25CrMo4 poboljšan

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,1381
2	0,1319
3	0,1228
4	0,1217
Srednja vrijednost gubitka mase: 0,1286	

Tablica 64. Rezultati ispitivanja 12- 05 Čelik EN 25CrMo4 nitriran

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,1576
2	0,1534
3	0,1483
4	0,1379
Srednja vrijednost gubitka mase: 0,1493	

Tablica 65. Rezultati ispitivanja 12- 06 Čelik EN 25CrMo4 tvrdo kromiran

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,1405
2	0,1300
3	0,1190
4	0,1221
Srednja vrijednost gubitka mase: 0,1279	

Tablica 66. Rezultati ispitivanja 12- 07 Čelik EN 36CrNiMo4 poboljšan

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,1238
2	0,1190
3	0,1214
4	0,1189
Srednja vrijednost gubitka mase: 0,1207	

Tablica 67. Rezultati ispitivanja 12- 08 Čelik EN 36CrNiMo4 nitriran

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,1475
2	0,1392
3	0,1392
4	0,1313
Srednja vrijednost gubitka mase: 0,1393	

Tablica 68. Rezultati ispitivanja 12- 09 Čelik EN 36CrNiMo4 tvrdo kromiran

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,1230
2	0,1211
3	0,1222
4	0,1170
Srednja vrijednost gubitka mase:	0,1208

4.13. Rezultati ispitivanja poboljšanog, nitrokarburiranog, boriranog i vanadiranog čelika

Rezultati ispitivanja 13 odnose se na ispitivanja provedena u [16].

Predmet ispitivanja je **nelegirani čelik za poboljšavanje EN C45** (prema HRN: Č 1531) kemijsko sastava. 0,45 % C, 0,64 % Mn, 0,012 % P, 0,016 % S, 0,22 % Si, 0,013 % Mo, 0,09 % Cr, 0,066 % Ni.

Uzorak je podvrgnut sljedećim toplinskim obradama i nakon toga je za svaki uzorak provedeno ispitivanje:

- kaljenje i popuštanje (uzorak 1)
- nitrokarburiranje postupkom TENIFER (uzorak 2)
- nitrokarburiranje postupkom TENIFER-QPQ (ABI 390 °C) (uzorak 3)
- nitrokarburiranje postupkom TENIFER-QPQ (ABI 420 °C) (uzorak 4)
- boriranje u prašku (uzorak 5)
- vanadiranje u solnoj kupci (uzorak 6)

Ispitivanje je provedeno pri opterećenju od 15 N do 2000 okretaja. Kao abraziv je korišten kremenij pijesak oznake B 35 S zrnatosti 0,063 - 0,355 mm, proizvođača Kema Puconci d.d..

Tablica 69. Rezultati ispitivanja 13 Čelik EN C45 topl. obrađen [15]

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,22
2	0,2179
3	0,2191
4	0,19655
5	0,0409
6	0,153

4.14. Rezultati ispitivanja izotermički poboljšanog i kugličarenog nodularnog lijeva

Rezultati ispitivanja 14 odnose se na ispitivanja provedena u [17].

Materijal koji je ispitivan je **nodularni lijev NL 60** kemijskog sastava: 3,57 % C, 2,49 % Si, 0,113 % Mn, 0,029 % P, 0,007 % S, 0,4 % Cu, 0,057 % Mg, koji je podvrgnut izotermičkom poboljšavanju. Nakon toplinske obrade uzorci su podvrgnuti sljedećim mehaničkim obradama:

- kugličarenje na 8 bar (uzorak 1)
- kugličarenje na 6,5 bar (uzorak 2)
- kugličarenje na 5 bar (uzorak 3)
- nekugličaren (uzorak 4).

Ispitivanje je provedeno pri opterećenju od 130 N pri 100 okretaja kotača.

Tablica 70. Rezultati ispitivanja 14- 01 NL 60, kugl. 8 bar

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,025
2	0,0216
3	0,0237
Srednja vrijednost gubitka mase:	0,02343

Tablica 71. Rezultati ispitivanja 14- 02 NL 60, kugl. 6,5 bar

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,0284
2	0,0235
3	0,0274
Srednja vrijednost gubitka mase:	0,02643

Tablica 72. Rezultati ispitivanja 14- 03 NL 60, kugl. 5 bar

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,0248
2	0,0227
3	0,0228
Srednja vrijednost gubitka mase:	0,02343

Tablica 73. Rezultati ispitivanja 14- 04 NL 60, nekugličareno

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,0331
2	0,0269
3	0,0263
Srednja vrijednost gubitka mase:	0,0287

4.15. Rezultati ispitivanja polimernih kompozitnih smola

Rezultati ispitivanja 14 odnose se na ispitivanja provedena u [18].

Ispitivanja su provedena na dva materijala:

- prvi materijal je **Super Metal** polimerna kompozitna smola tvrtke Belzona
(uzorak 1)
- drugi materijal je **Super E-Metal** polimerna kompozitna smola tvrtke Belzona
(uzorak 2).

Nakon provođenja ispitivanja otpornosti na abraziju, uzorci su uronjeni na 24 sata u 10% otopinu HCl, te je nakon toga na uzorcima ponovno provedeno ispitivanje.

Ispitivanje je provedeno pri opterećenju od 45 N i 100 okretaja kotača.

Tablica 74. Rezultati ispitivanja 15- 01 Super Metal

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,02588
2	0,0275
3	0,02544
Srednja vrijednost gubitka mase:	0,02627

Tablica 75. Rezultati ispitivanja 15- 02 Super Metal 10% HCl

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,0211
2	0,0242
3	0,0215
Srednja vrijednost gubitka mase:	0,022

Tablica 76. Rezultati ispitivanja 15- 03 Super E-Metal

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,0169
2	0,0176
3	0,01916
Srednja vrijednost gubitka mase:	0,0178

Tablica 77. Rezultati ispitivanja 15- 04 Super E-Metal 10% HCl

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,01548
2	0,00984
3	0,01322
Srednja vrijednost gubitka mase:	0,0128

4.16. Rezultati ispitivanja toplinski obrađenog dupleks čelika

Rezultati ispitivanja 16 odnose se na ispitivanja provedena u [19].

Ispitivani materijal je **dupleks čelik X2 CrNiMoN 22 5 3** žaren na 1080 °C i gašen u vodi.

Kemijski sastav: 0,018 % C, 5,49% Ni, 22,64 % Cr, 1,87 % Mn, 0,28 % Si, 0,027 % P, 0,0004 % S, 0,15 % N, 2,88 % Mo (uzorak 1).

Za potrebe istraživanja na uzorku su provedene sljedeće toplinske obrade:

- grijanje na 1100 °C i hlađenje u struji dušika (uzorak 2)
- grijanje na 1200 °C i hlađenje u struji dušika (uzorak 3)
- grijanje na 1250 °C i hlađenje u struji dušika (uzorak 4)
- grijanje na 1300 °C i hlađenje u struji dušika (uzorak 5)
- grijanje na 800 °C u trajanju od 60 minuta hlađen na zraku (uzorak 6)
- grijanje na 800 °C u trajanju od 120 minuta hlađen na zraku (uzorak 7)
- grijanje na 800 °C u trajanju od 180 minuta hlađen na zraku (uzorak 8)
- zavaren spoj, gdje je kao dodatni materijal korišten Cromacore DW 329AP Duplex tvrtke Elga, Švedska (uzorak 9).

Ispitivanje je provedeno prema B varijanti postupka.

Tablica 78. Rezultati ispitivanja 16- 01 Dupleks čelik X2 CrNiMoN 22 5 3

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak mase, g</i>
1	0,2227
2	0,2328
3	0,2601
4	0,2193
5	0,2129
6	0,2420
7	0,2653
8	0,2950
9	0,2922

4.17. Rezultati ispitivanja aluminij oksidne prevlake

Rezultati ispitivanja 17 odnose se na ispitivanja provedena u [4].

Materijal na kojem je provedeno ispitivanje je Al_2O_3 prevlaka nanešena na čeličnu podlogu na više varijanti s ciljem da se vidi utjecaj pripreme podloge na otpornost prema abraziji:

- tip 1: pripremljen po propisima proizvođača praška za naštrcavanje (uzorak 1)
- tip 2: brušen s nanesenim vezivom (uzorak 2)
- tip 3: pjeskaren bez nanesenog veziva (uzorak 3)
- brušen bez nanesenog veziva (uzorak 4)

Ispitivanje je provedeno modificiranom varijantom C gdje je sila opterećenja 130 N i 200 okretaja, i modificiranom varijantom D gdje je sila opterećenja 45 N i 200 okretaja gumenog kotača. Ispitivanje modificiranom varijantom C je provedeno na dva uzorka za svaki tip, dok je ispitivanje modificiranom varijantom D provedeno na jednom uzorku za pojedini tip nanošenja podloge.

Tablica 79. Rezultati ispitivanja 19- 01 Varijanta D, mod.

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak volumena 100 okr., mm³</i>	<i>Gubitak volumena, 200 okr., mm³</i>
1	6,8844	11,4824
2	0,00984	12,9648
3	4,6482	7,6382
4	10,1256	16,7337

Tablica 80. Rezultati ispitivanja 19- 02 Varijanta C, mod., tip 1

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak volumena 100 okr., mm³</i>	<i>Gubitak volumena, 200 okr., mm³</i>
1	18,6683	32,7638
2	24,1960	43,8693
Srednja vrijednost gubitka volumena: 21,43215		38,31655

Tablica 81. Rezultati ispitivanja 19- 03 Varijanta C, mod., tip 2

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak volumena 100 okr., mm³</i>	<i>Gubitak volumena, 200 okr., mm³</i>
1	26,4573	44,6231
2	15,7286	29,0452
Srednja vrijednost gubitka volumena: 21,0929		36,8341

Tablica 82. Rezultati ispitivanja 19- 04 Varijanta C, mod., tip 3

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak volumena 100 okr., mm³</i>	<i>Gubitak volumena, 200 okr., mm³</i>
1	14,1206	23,7437
2	18,4925	30,6030
Srednja vrijednost gubitka volumena: 16,3065		27,1133

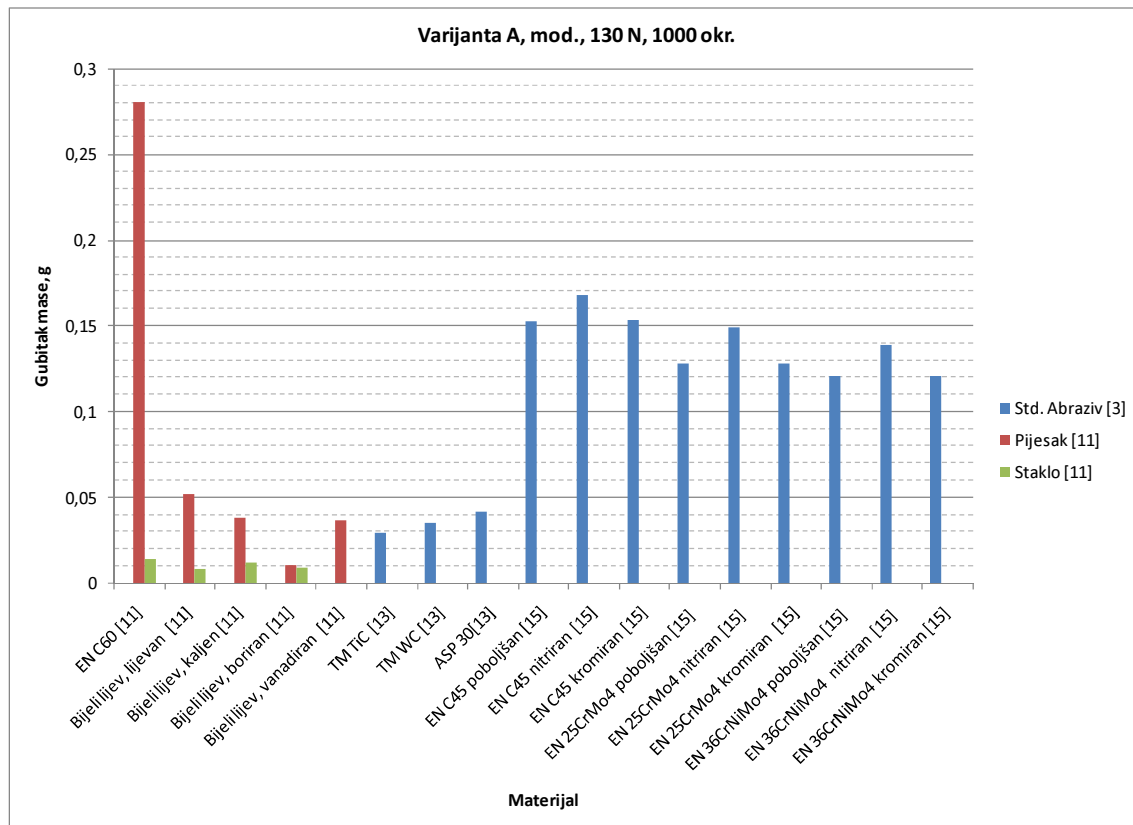
Tablica 83. Rezultati ispitivanja 19- 05 Varijanta C, mod., tip 4

<i>Uzorak</i>	<i>Gubitak volumena 100 okr., mm³</i>	<i>Gubitak volumena, 200 okr., mm³</i>
1	21,9347	37,2613
2	sloj se oljuštio	
Srednja vrijednost gubitka volumena:		
	21,9347	37,2613

5. ANALIZA REZULTATA

Analiza rezulta se provodi samo za ona ispitivanja koja su provedena u identičnim uvjetima (isto opterećenje, isti broj okretaja i ista vrsta abraziva). Svaka modificirana varijanta je prikazana posebnim dijagramom iznad kojeg su navedeni uvjeti provođenja ispitivanja.

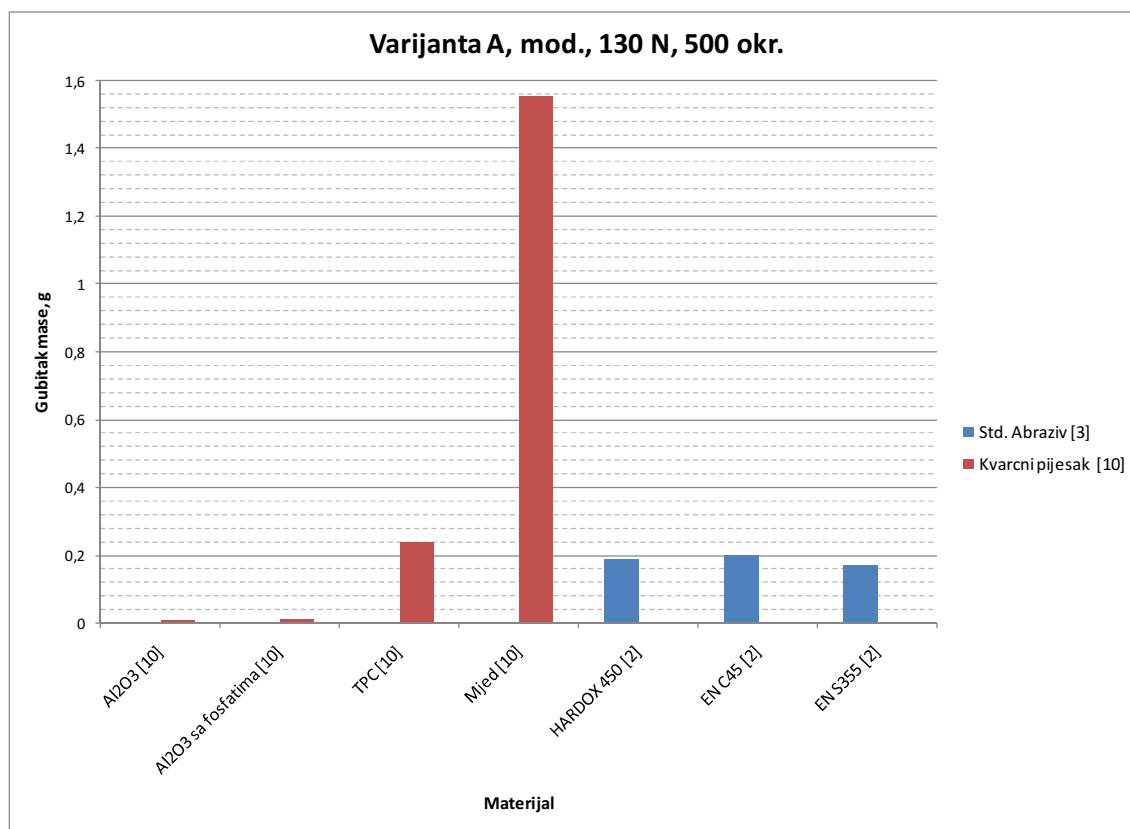
Za varijantu postupka A provedeno je samo jedno ispitivanje za materijal nodularni lijev [6], i srednja vrijednost gubitka mase mu iznosi 0,92276 g.



Slika 5.1. Usporedba rezultata prema mod. varijanti A, 130 N, 1000 okr.

Slika 5.1. pokazuje utjecaj abraziva na trošenje materijala, što se najviše vidi kod čelika EN C60, koji je ujedno prilikom ispitivanja i pokazao najošiju otpornost abraziji.

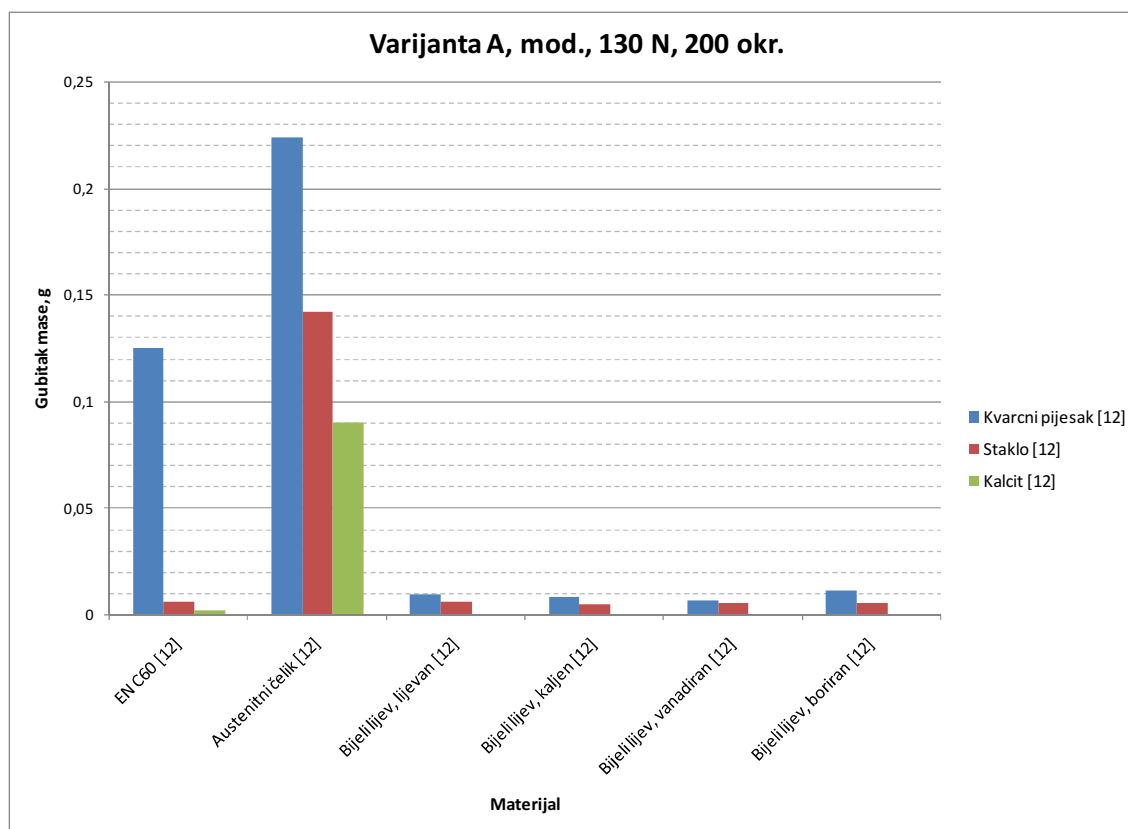
Kod ispitivanja standardnim abrazivom najbolju otpornost su pokazali tvrdi materijali, kao što je i za očekivati, s obzirom na njihovu upotrebu u uvjetima gdje je velika abrazija.



Slika 5.2. Usporedba rezultata prema mod. varijanti A, 130 N, 500 okr.

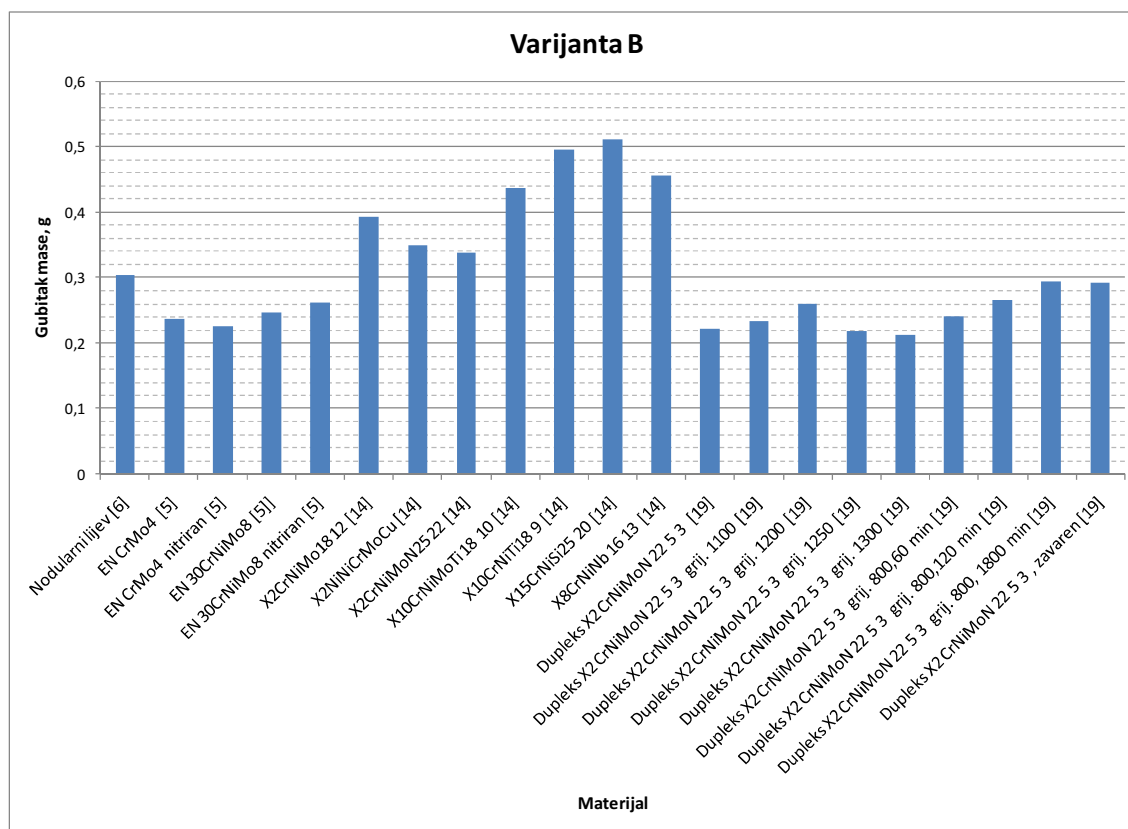
Slika 5.2. pokazuje malu otpornost mjedi prema abraziji, što je za očekivati prema maloj vrijednosti površinske tvrdoće mjedi. Također se vidi i velika otpornost prema abraziji aluminij – oksidne smole.

Materijali ispitivani u [2] pokazuju relativno jednaku otpornost prema abraziji.



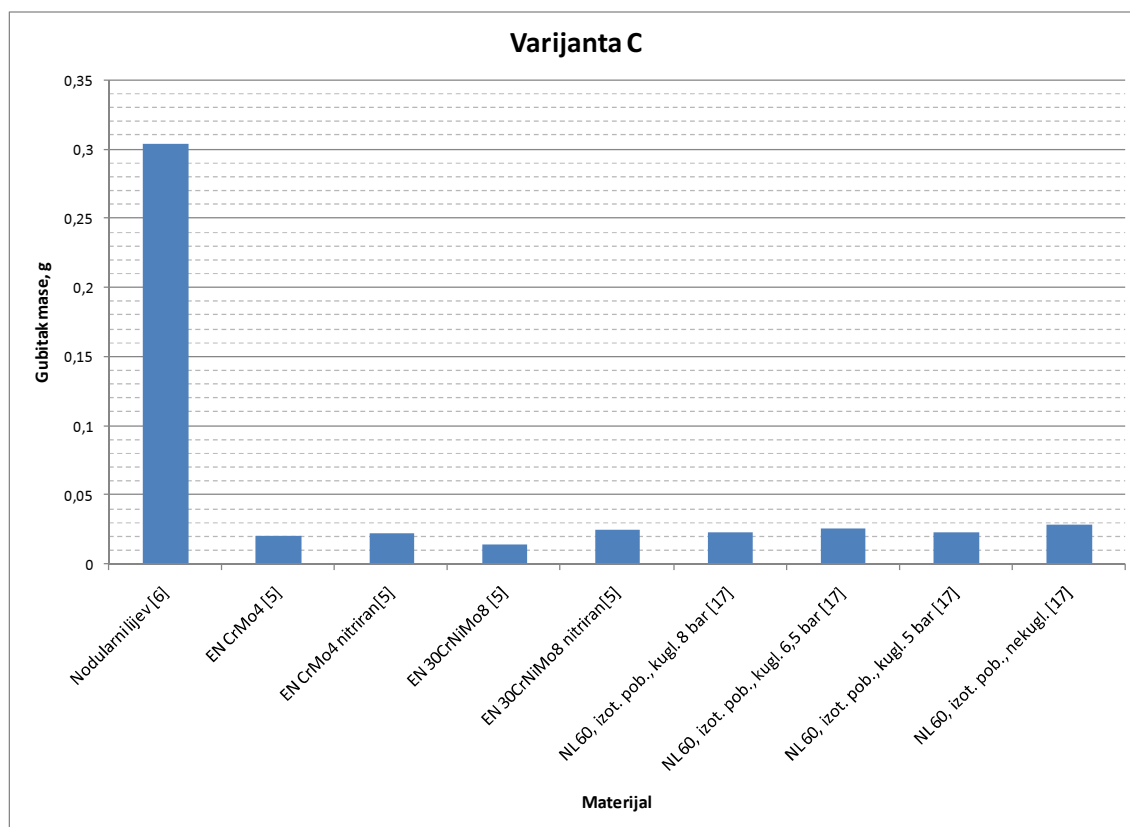
Slika 5.3. Usporedba rezultata prema mod. varijanti A, 130 N, 200 okr.

Slika 5.3. kao i slika 5.1. pokazuje utjecaj abraziva na otpornost abraziji. Čelik EN C60 ima veću otpornost prema abraziji nego nehrđajući austenitni čelik, ali puno manju otpornost nego bijeli lijev podvrgnut toplinskim i površinskim obradama.



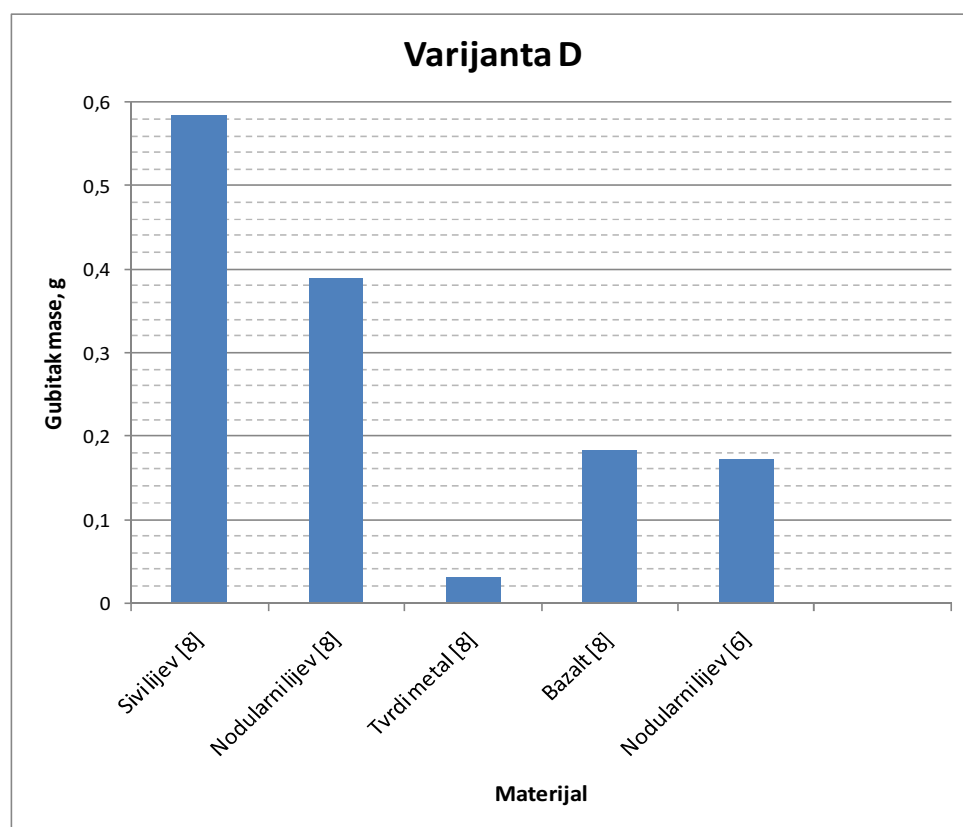
Slika 5.4. Usporedba rezultata prema varijanti B

Slika 5.4. pokazuje da najbolju otpornost abraziji imaju čelik EN CrMo4 sa nitriranom površinom i dupleks čelik X2 CrNiMoN 22 5 3 žaren na 1080 °C i gašen u vodi, i dupleks čelik X2 CrNiMoN 22 5 3 grijan na 1300 °C i 1250 °C. Najslabiju otpornost abraziji su pokazali čelici X15CrNiSi25 20 i X10CrNiTi18 9.



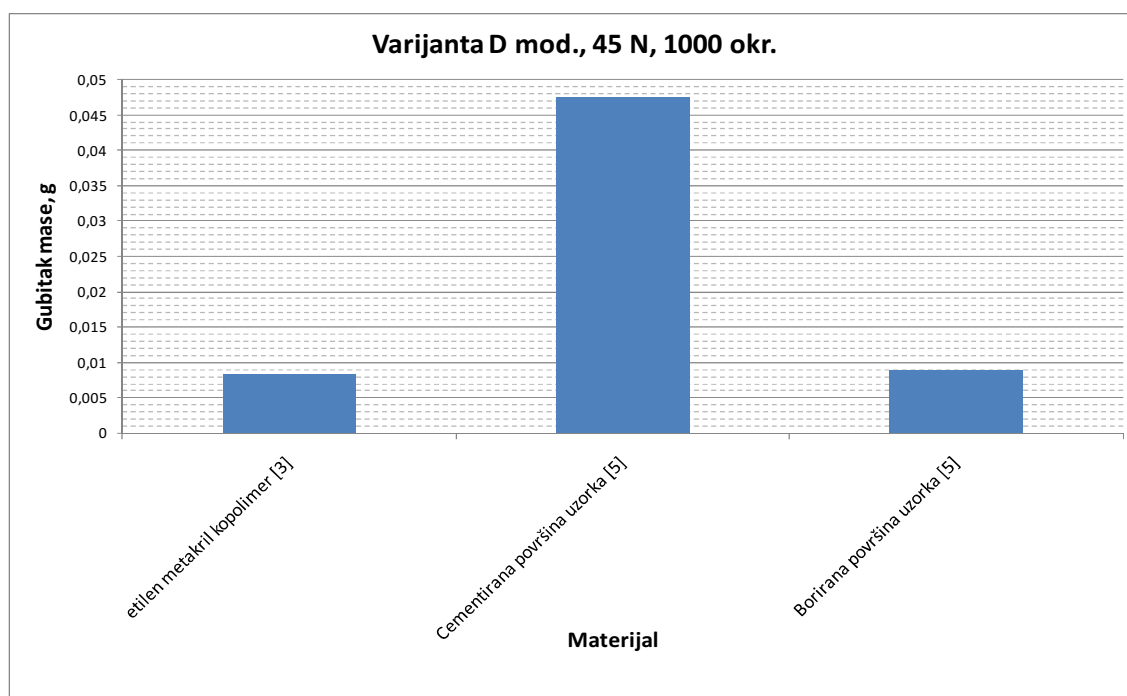
Slika 5.5. Usporedba rezultata prema varijanti C

Slika 5.5 pokazuje utjecaj toplinske obrade na otpornost materijala abraziji, što se može zaključiti iz podataka za toplinski neobrađen nodularni lijev [6] koji pokazuje malu otpornost abraziji i za izotermički poboljššan NL 60 koji pokazuje veliku otpornost prema abraziji.

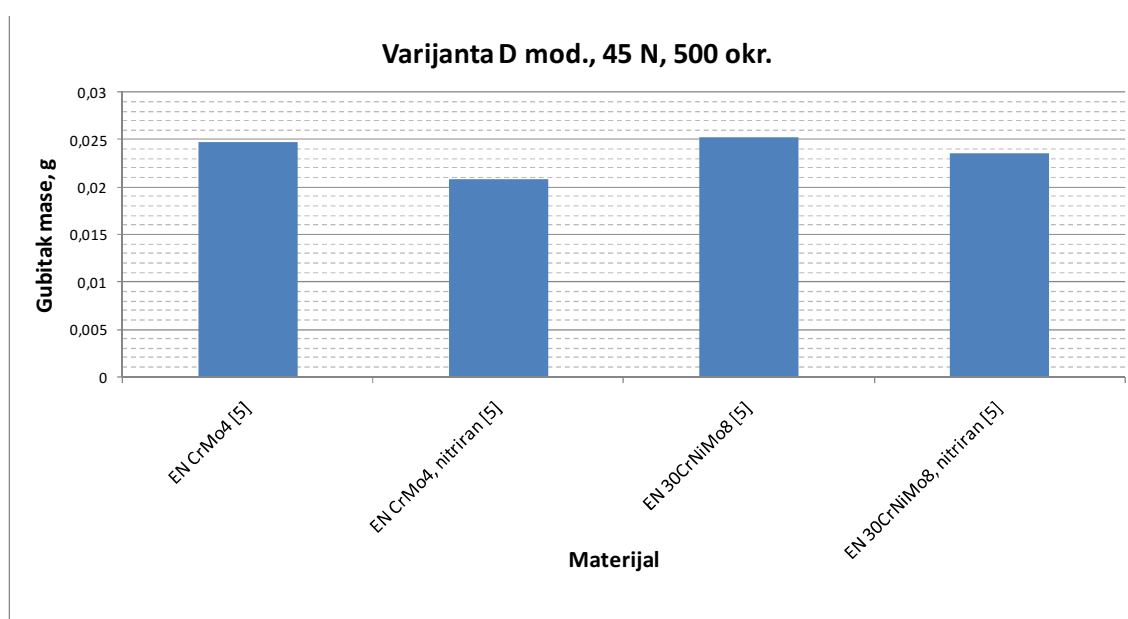


Slika 5.6. Usporedba rezultata prema varijanti D

Slika 5.6. pokazuje malu otpornost nodularnog lijeva [8] na abraziju i veliku otpornost tvrdog metala

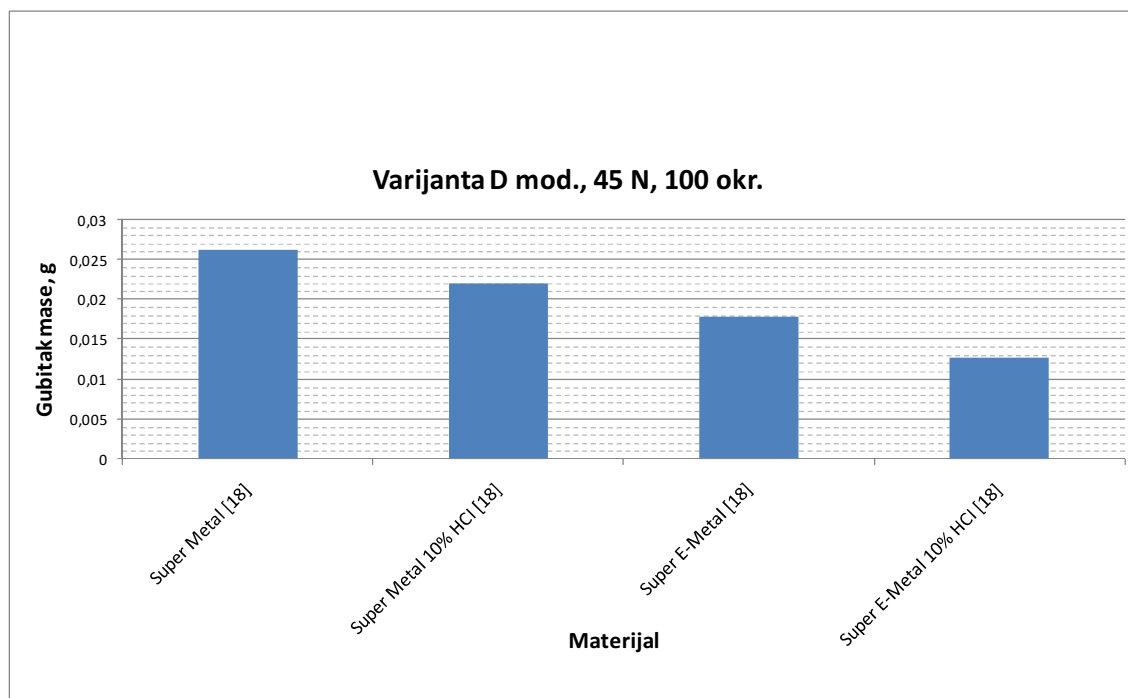


Slika 5.7. Usporedba rezultata prema mod. varijanti D, 45 N, 1000 okr.



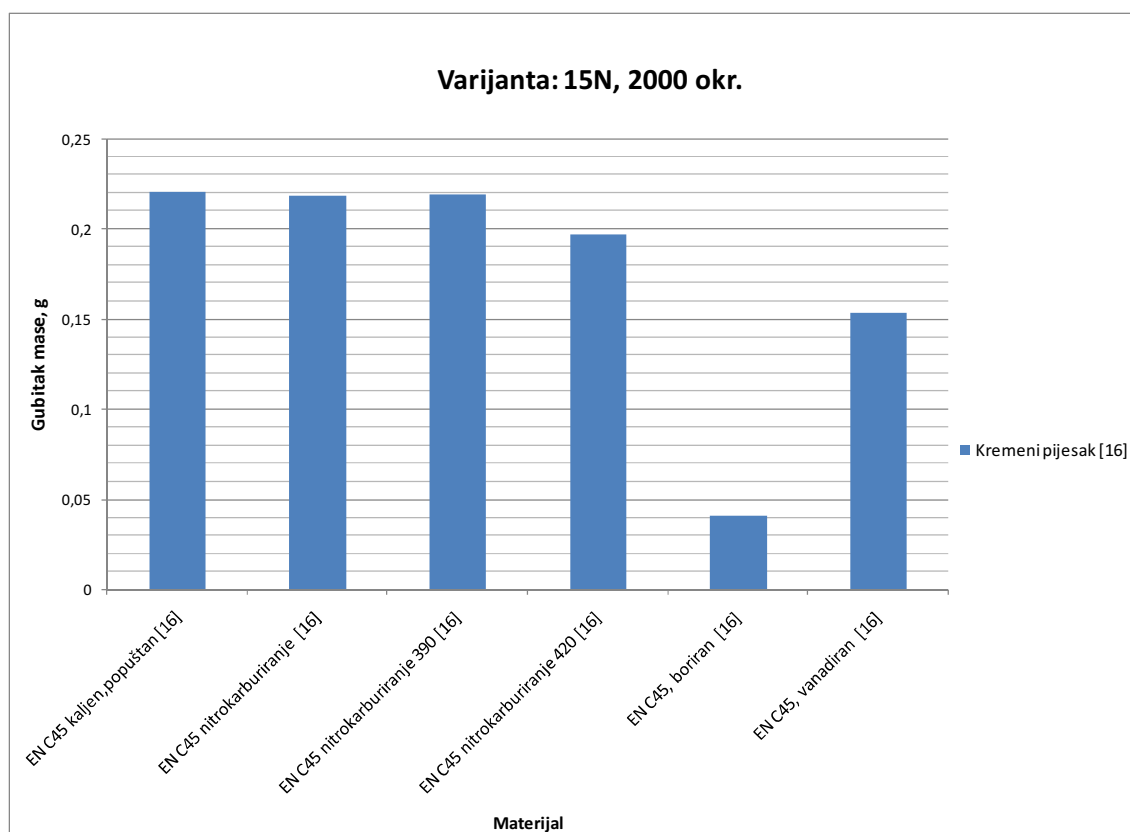
Slika 5.8. Usporedba rezultata prema mod. varijanti D, 45 N, 500 okr.

Na slici 5.8. se vidi povećanje otpornosti na abraziju koje se postiglo nitriranjem površinskog sloja čelika.



Slika 5.8. Usporedba rezultata prema mod. varijanti D, 45 N, 100 okr.

Slika 5.8. pokazuje otpornost na abraziju polimernih kompozitnih smola, i njihovo povećanje otpornosti na abraziju uranjanjem u HCl.



Slika 5.9. Usporedba rezultata prema mod. varijanti D, 45 N, 100 okr.

Slika 5.9. pokazuje utjecaj različitih toplinskih obrada na otpornost prema abraziji. Iz podataka vidimo da je kaljenje i popuštanje najmanje povećalo otpornost prema abraziji, dok je najveća otpornost prema abraziji postignuta boriranjem.

6. ZAKLJUČAK

Abrazijsko trošenje je najčešći mehanizam trošenja. Postoji više standardnih metoda ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje, a najčešće korištena metoda je ASTM G65 (metoda “suhi pijesak/gumeni kotač”). Iako je ova metoda standardizirana, standard omogućuje variranje pojedinih parametara ispitivanja što značajno otežava usporedbu rezultata dobivenih ispitivanjima različitih ispitivača.

Na otpornost na trošenje osim samog materijala značajno utječu vrsta abraziva i naknadne obrade na materijalu. Kao što se može očitati iz podataka pravilnim odabirom i obradom materijala njegova otpornost na abraziju se može povećati i nekoliko puta.

Radi lakše usporedbe otpornosti različitih materijala na abraziju najidealnije bi bilo provoditi sva ispitivanja pod istim uvjetima, jer se inače dolazi do velikog broja podataka, koje je nemoguće paralelno usprediti.

7. LITERATURA

- [1] Ivušić, Vinko: Tribologija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [2] Dobranić, Boris: Trošenje dijelova građevinskih strojeva, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012
- [3] Standard ASTM: G 65 - 85: Conducting dry sand/rubber wheel abrasion tests
- [4] Sabolić, Tomislav: Otpornost na abrazijsko trošenje toplinski naštrcanih Al_2O_3 prevlaka, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007
- [5] Robertino, Mileta: Istraživanje otpornosti na trošenje toplinski obrađenih čelika za izradu topničkih oružja, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2000
- [6] Medven, Mario: Primjena fotogrametrije pri određivanju abrazijske otpornosti nodularnog lijeva, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011
- [7] Matulina, Julijan: Ispitivanje triboloških svojstava plastomernih prevlaka, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1997
- [8] Boban, Nela: Karakterizacija otpornosti trošenja, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992
- [9] Herceg, Jozo: Tribologija u proizvodnji sirovog ulja, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1996
- [10] Grbeš, Ivica: Analiza triboloških problema lijevaonice, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998
- [11] Jurišić, Igor: Karakterizacija otpornosti materijala abraziji, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1990
- [12] Kolednjak, Davor: Provjera valjanosti indeksa otpornosti abraziji, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1989
- [13] Hren, Ivan: Abrazijsko trošenje tvrdog metala i alatnog čelika, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012
- [14] Boras, Miro: Otpornost nehrđajućih čelika abraziji i eroziji, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992
- [15] Šimičić Marko: Abrazijsko trošenje ožljebljenih cijevi topničkih oružja, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012

-
- [16] Krsnik, Bojan: Usporedba površinskih slojeva otpornih na trošenje, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010
 - [17] Ilić, Marko: Karakterizacija izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009
 - [18] Turkalj, Josip: Korozijsko- erozijska - abrazijska svojstva epoksidnih prevlaka, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012
 - [19] Rede, Vera Utjecaj mikrostrukture zavara dupleks čelika na opornost prema trošenju, Doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004